



TUGAS AKHIR - TE 141599

**RANCANG BANGUN SISTEM *ACTIVE NOISE*
CANCELLATION UNTUK SATU ARAH
RAMBATAN SUARA**

Albert Christianto
NRP 2213100091

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Hendra Kusuma, M.Eng.Sc.
Astria Nur Irfansyah, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ACTIVE NOISE
CANCELLATION SYSTEM FOR ONE DIRECTION OF
SOUND PROPAGATION**

Albert Christianto
NRP 2213100091

Supervisor
Dr. Ir. Hendra Kusuma, M.Eng.Sc.
Astria Nur Irfansyah, ST., M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir yang dibuat dengan judul

Rancang Bangun Sistem *Active Noise Cancellation* untuk Satu Arah
Rambatan Suara

adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Albert Christianto
NRP. 2213100091

**RANCANG BANGUN SISTEM *ACTIVE NOISE CANCELLATION*
UNTUK SATU ARAH RAMBATAN SUARA**


TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Elektronika
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

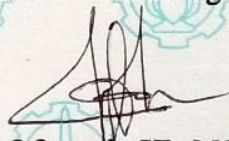
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. Ir. Hendra Kusuma, M.Eng.Sc.
NIP. 196409021989031003

Dosen Pembimbing II



Astria Nur Irfansyah, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 198103252010121002



Rancang Bangun Sistem *Active Noise Cancellation* untuk Satu Arah Rambatan Suara

Nama : Albert Christianto
Pembimbing 1 : Dr. Ir. Hendra Kusuma, M.Eng.Sc.
Pembimbing 2 : Astria Nur Irfansyah, ST. M.Eng. Ph.D.

ABSTRAK

Suara bising yang dihasilkan oleh mesin, benturan, ledakan, dan lain sebagainya merupakan polusi suara yang dapat berdampak buruk bagi kesehatan pendengaran manusia. Beberapa gangguan kesehatan diantaranya adalah penyakit jantung dan tekanan darah tinggi, dapat disebabkan oleh paparan suara bising. Kondisi psikologis manusia juga dapat terpengaruh oleh suara bising. Sistem *Active Noise Cancellation* (ANC) merupakan salah satu cara untuk dapat mengurangi suara bising tersebut. Pada tugas akhir ini telah dibuat sebuah sistem yang terdiri dari STM32F4 dan rangkaian analog pendukung yang dapat meredam suara bising dari 20 - 600 Hz (*tonal noise*). Sistem ANC yang dibuat hanya untuk satu arah rambatan suara dengan menggunakan *acoustic duct*. Pada penelitian ini dilakukan 2 buah metode pemrosesan sinyal suara bising, yaitu dengan menggunakan *all-pass filter* sebagai penunda sinyal input dan dengan mikrokontroller STM32F4. Hasil uji coba sistem ANC dengan menggunakan *all-pass filter* hanya dapat meredam suara bising hingga 4,5 dB untuk sinyal suara frekuensi 120 Hz. Sistem ANC dengan mikrokontroller STM32F4 mampu memberikan hasil yang lebih baik dengan pemrosesan sinyal digital menggunakan filter adaptif *Filtered- x Least Mean Square* (FxLMS) sehingga suara bising dengan frekuensi 400 Hz. dapat diredam hingga 11,5 dB.

Kata kunci: *acoustic duct*, *all-pass filter*, *active noise cancellation*, filter adaptif FxLMS

-halaman ini sengaja dikosongkan

Design and Implementation of Active Noise Cancellation System for One Direction of Sound Propagation

Name : Albert Christianto
Supervisor : Dr. Ir. Hendra Kusuma, M.Eng.Sc.
Co-Supervisor : Astria Nur Irfansyah, ST. M.Eng. Ph.D.

ABSTRACT

Noise can affect human hearing adversely which are generated by the engine, impact, explosion, etc. Some health problems such as heart disease and high blood pressure can be caused by noisy exposure. Noise can also affect human psychology. Active Noise Cancellation (ANC) system is used to reduce noise. In this final project has been created a system consisting of STM32F4 and supporting analog circuit that can muffle noise from 20 - 600 Hz (tonal noise). ANC system is made for 1 direction by using acoustic duct. In this final project, there are 2 methods that are used. First method is delaying input signal by using all pass filter and second method is using filtered-x Least Mean Square (FxLMS) with STM32F4. ANC system with all-pass filter can only reduce noise up to 4.5 dB for 120 Hz noise. ANC system with FxLMS adaptive filter with STM32F4 gives a better result noise is 400 Hz noise can be muffled up to 11.5 dB.

Keywords: acoustic duct, all-pass filter, active noise cancellation, FxLMS adaptive filter

-halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas terselesaikannya Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Active Noise Cancellation untuk Satu Arah Rambatan Suara”. Penulis sadar bahwa dengan tanpa adanya bantuan dari pihak lain penulis tidak dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Dengan segala hormat dan rasa rendah diri penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa. Yang telah memberi kesehatan dan kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan masalah-masalah yang ditemui dalam pengerjaan tugas akhir ini.
2. Keluarga penulis, yaitu ayah, C.A. Indrajaya, ibu, Erna Erawati, dan kedua adik saya, Richard Sugiarto dan Olivia Rosalinda yang telah memberikan semangat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini
3. Dosen pembimbing 1, Dr. Ir. Hendra Kusuma, M.Eng.Sc. atas segala ilmu, bimbingan, dan pengarahannya kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Dosen pembimbing 2, Astria Nur Irfansyah, ST. M.Eng. Ph.D. atas segala ilmu, bimbingan, dan pengarahannya kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini
5. Seluruh keluarga besar yang juga telah memberikan perhatian dan dukungan kepada saya
6. Teman-teman dekat saya, Andrianto, aDella, Fandi, dan Kevin atas semangat dan dukungannya.
7. Seluruh teman – teman bidang studi elektronika 2013

Terima kasih juga pada pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Penulis sadar bahwa banyaknya kekurangan dari penulis dalam penulisan laporan ini. Penulis mengharapkan masukan, kritik, dan saran untuk meningkatkan kualitas dari laporan ini dan semoga laporan ini dapat bermanfaat untuk kedepannya.

Surabaya, Mei 2017

Penulis

-halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi	4
 BAB II LANDASAN TEORI	 5
2.1 Suara.....	5
2.1.1 Pengertian Suara	5
2.1.2 Decibel (dB).....	6
2.1.3 Perambatan Suara.....	7
2.1.4 Gelombang diam.....	7
2.2 <i>Power Amplifier</i>	8
2.3 <i>Pre-Amplifier</i>	9
2.4 <i>Automatic Gain Controller</i>	10
2.5 <i>Low Pass Filter</i>	10
2.6 <i>Coupling DC</i>	11
2.7 <i>All-pass Filter</i>	11
2.8 Transformasi Z	12
2.9 <i>Finite Impulse Response Filter</i>	12
2.10 Filter Adaptif dan Algoritma <i>Least Mean Square</i>	13
2.11 <i>Active Noise Cancellation</i>	14
 BAB III PERANCANGAN SISTEM.....	 17
3.1 Sistem <i>Active Noise Cancellation</i> untuk Satu Arah Rambatan Suara	17
3.1.1 Perancangan <i>Acoustic Duct</i>	17

3.1.2	Blok Diagram Sistem <i>Active Noise Cancellation</i> untuk Satu Arah Rambatan Suara.....	18
3.1.3	<i>Flowchart</i> Program <i>Active Noise Cancellation</i>	19
3.2	Komponen Penyusun Sistem <i>Active Noise Cancellation</i>	22
3.2.1	STM32F4-Discovery	22
3.2.2	<i>Power Amplifier</i> , <i>Pre-Amplifier</i> , dan <i>Automatic Gain Controller</i>	23
3.2.3	<i>Antialiasing</i> dan <i>Reconstruction Filter</i>	25
3.2.4	<i>All-Pass Filter</i>	26
3.3	Filter Adaptif <i>Filtered-x Least Mean Square</i>	26
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA		29
4.1	Alat ukur yang digunakan.....	29
4.2	Pengujian <i>Active Noise Cancelling</i> dengan Penggeser Fasa menggunakan <i>All-Pass Filter</i>	31
4.3	Pengujian Fenomena Gelombang Diam pada <i>Acoustic Duct</i>	35
4.4	Pengujian <i>Automatic Gain Controller</i>	40
4.5	Pengujian <i>Active Noise Cancellation</i> dengan Filter Adaptif FxLMS.....	43
4.6	Anomali-Anomali Hasil Pengujian Sistem <i>Active Noise Cancellation</i> dengan Filter Adaptif FxLMS	47
BAB V PENUTUP		53
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....		55
LAMPIRAN		57
RIWAYAT PENULIS		61

TABLE OF CONTENTS

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
PREFACE	v
TABLE OF CONTENTS	vii
LIST OF FIGURES	xi
LIST OF TABLES	xiii
 BAB I PRELIMINARY	 1
1.1 Background	1
1.2 Problems	2
1.3 Scope of Problems	2
1.4 Purpose	2
1.5 Methodology	2
1.6 Writing Structure	3
1.7 Relevance	4
 BAB II THEORETICAL BASIS	 5
2.1 Sound	5
2.1.1 Introduction to Sound	5
2.1.2 Decibel (dB)	6
2.1.3 Sound Propagation	7
2.1.4 Standing Wave	7
2.2 Power Amplifier	8
2.3 Pre-Amplifier	9
2.4 Automatic Gain Controller	10
2.5 Low Pass Filter	10
2.6 Coupling DC	11
2.7 All-pass Filter	11
2.8 Z Transform	12
2.9 Finite Impulse Response Filter	12
2.10 Adaptive Filter and Least Mean Square Algorithm	13
2.11 Active Noise Cancellation	14
 BAB III SYSTEM PLANNING	 17
3.1 Active Noise Cancellation System for One Direction of Sound Propagation	17
3.1.1 Acoustic Duct's Design	17

3.1.2	Block Diagram of Active Noise Cancellation System for One Direction of Sound Propagation	18
3.1.3	Flowchart of Active Noise Cancellation's Program ..	19
3.2	Active Noise Cancellation System's Component.....	22
3.2.1	STM32F4-Discovery	22
3.2.2	Power Amplifier, Pre-Amplifier, and Automatic Gain Controller.....	23
3.2.3	Antialiasing and Reconstruction Filter	25
3.2.4	All-Pass Filter	26
3.3	Filtered-x Least Mean Square Adaptive Filter	26
BAB IV TESTING AND ANALYSIS		29
4.1	Measuring Instrument Used	29
4.2	Active Noise Cancelling with Phase Shifter using All-Pass Filter Testing.....	31
4.3	Standing Wave Testing in Acoustic Duct	35
4.4	Automatic Gain Controller Testing	40
4.5	Active Noise Cancellation with FxLMS Adaptive Filter Testing	43
4.6	Anomaly in Active Noise Cancellation system with FxLMS Adaptive Filter Testing's Result	47
BAB V CLOSING.....		53
5.1	Conclusion.....	53
5.2	Suggestion	53
BIBLIOGRAPHY.....		55
APPENDIX.....		57
BIOGRAPHY.....		61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gelombang diam pada pipa terbuka.....	8
Gambar 2.2	Rangkaian <i>power amplifier</i> dengan TDA2030	9
Gambar 2.3	Rangkaian <i>pre amplifier</i>	9
Gambar 2.4	<i>Automatic gain controller</i>	10
Gambar 2.5	-40 dB/decade <i>low pass filter</i>	10
Gambar 2.6	<i>Coupling DC</i>	11
Gambar 2.7	<i>All-Pass filter</i>	11
Gambar 2.8	Blok diagram FIR filter	13
Gambar 2.9	Blok Diagram filter adaptif LMS.....	14
Gambar 2.10	<i>Active Noise Cancellation</i>	15
Gambar 2.11	Desain <i>acoustic duct</i> [1]	16
Gambar 3.1	Rancangan <i>acoustic duct</i>	17
Gambar 3.2	Diagram blok sistem ANC pada <i>acoustic duct</i>	18
Gambar 3.3	Blok diagram program <i>secondary path modelling</i>	20
Gambar 3.4	Blok diagram program ANC.....	20
Gambar 3.5	<i>Flowchart training mode</i>	21
Gambar 3.6	<i>Flowchart ANC mode</i>	22
Gambar 3.7	STM32F4-Discovery	22
Gambar 3.8	Spesifikasi dari STM32F4 Discovery	23
Gambar 3.9	<i>Power amplifier</i> dengan TD2030	24
Gambar 3.10	<i>Pre-amplifier</i> dengan TL071	24
Gambar 3.11	AGC.....	25
Gambar 3.12	-40 dB/decade <i>low pass filter</i>	25
Gambar 3.13	<i>All-pass filter</i>	26
Gambar 3.14	<i>Flowchart</i> filter adaptif FxLMS	28
Gambar 4.1	Multimeter <i>digital</i> Sanwa CD800a	29
Gambar 4.2	Osiloskop BK precision 2542B 100 MHz	30
Gambar 4.3	Alat ukur panjang	30
Gambar 4.4	dB meter	30
Gambar 4.5	Blok diagram sistem ANC dengan <i>all-pass filter</i>	31
Gambar 4.6	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 122 Hz.....	33
Gambar 4.7	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 217,4 Hz.....	34
Gambar 4.8	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 326,8 Hz.....	34

Gambar 4.9	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 420,2 Hz	34
Gambar 4.10	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 497,5 Hz	35
Gambar 4.11	Plot intensitas suara terhadap frekuensi.....	35
Gambar 4.12	Sinyal input <i>noise speaker</i> (frekuensi 102 Hz dan 555,6Hz).....	36
Gambar 4.13	Sinyal output <i>pre-amplifier</i> pada <i>acoustic duct</i>	38
Gambar 4.14	Sinyal mikrofon referensi (kuning) dan sinyal mikrofon error (biru) pada frekuensi 100 Hz, 220 Hz, 320 Hz, 400 Hz, dan 520 Hz.....	39
Gambar 4.15	Plot AGC dengan sinyal sinus frekuensi 463 Hz.....	41
Gambar 4.16	Output sinyal <i>pre-amplifier</i> dengan AGC	43
Gambar 4.17	<i>Active Noise Cancellation</i> dengan Filter Adaptif FxLMS	45
Gambar 4.18	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 117,6 Hz	46
Gambar 4.19	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 183,5 Hz	46
Gambar 4.20	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 224,7 Hz	46
Gambar 4.21	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 413,2 Hz	47
Gambar 4.22	Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 500 Hz	47
Gambar 4.23	Level kekerasan suara bising frekuensi 117,6 Hz.....	48
Gambar 4.24	Level kekerasan suara bising frekuensi 183,5 Hz.....	48
Gambar 4.25	Level kekerasan suara bising frekuensi 224,7 Hz.....	48
Gambar 4.26	Level kekerasan suara bising frekuensi 413,2 Hz.....	49
Gambar 4.27	Level kekerasan suara bising frekuensi 500 Hz.....	49
Gambar 4.28	Grafik sinyal dan level kekerasan suara bising pada frekuensi 318,5 Hz	50
Gambar 4.29	Grafik sinyal dan level kekerasan suara bising saat sistem ANC aktif	50

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Peredaman sistem ANC dengan <i>all-pass filter</i>	31
Tabel 4.2 Gelombang diam pada <i>acoustic duct</i>	37
Tabel 4.3 AGC dengan sinyal sinus frekuensi 463 Hz	40
Tabel 4.4 Amplitudo sinyal pada <i>acoustic duct</i>	41
Tabel 4.5 <i>Active Noise Cancellation</i> dengan Filter Adaptif FxLMS	44

-halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Suara bising atau suara yang keras dapat diakibatkan oleh bermacam-macam sumber suara. Suara mesin, suara benturan, suara ledakan, dan sebagainya bisa menjadi penyebab suara bising atau suara keras yang mengganggu kehidupan manusia. Sebagian besar suara bising, yang termasuk ke dalam polusi suara, dihasilkan oleh mesin industri. Jumlah mesin yang ada dan jenis teknologi yang digunakan sangat mempengaruhi tingkat polusi suara yang ditimbulkan. Beberapa contoh mesin yang memiliki suara yang keras dan/atau suara bising yaitu, mesin produksi kayu, mesin pemotong baja, mesin pemasang komponen pada PCB, dan masih banyak lagi. Mesin-mesin ini menyebabkan polusi suara di lingkungan sekitar mesin tersebut.

Kesehatan manusia yang ada di sekitar mesin bersuara keras tersebut menjadi masalah yang harus diperhatikan. Suara bising dapat mempengaruhi kesehatan manusia. Beberapa gangguan kesehatan disebabkan oleh karena paparan suara bising dengan intensitas yang lama. Penyakit jantung adalah salah satu penyakit yang dapat disebabkan oleh suara bising. Selain itu suara bising juga dapat menyebabkan tekanan darah naik, kesehatan alat pendengaran terganggu, gangguan keseimbangan, dan dapat mempengaruhi kondisi psikologis manusia.[3] Karena itu, diperlukan suatu alat yang dapat mengurangi polusi suara untuk mencegah dampak-dampak buruk polusi suara bagi kesehatan.

Sistem *Active Noise Cancellation* (ANC) yang sudah ada umumnya terdiri dari *speaker* sekunder, *reference sensor*, *error sensor*, dan kontroler. Suara bising direkam oleh *reference sensor*, kemudian direkonstruksi kembali oleh *speaker* sekunder dengan amplitud yang sama dan beda fasa sebesar 180°. Suara bising yang dapat diredam dan dihilangkan oleh beberapa sistem ANC yang sudah ada juga masih terbatas pada suara-suara bising tertentu. Sistem ANC yang didesain untuk suatu jenis suara bising sehingga sering kali kurang optimal jika digunakan pada jenis suara bising yang lain.

Oleh karena itu, penulis mengajukan sebuah judul tugas akhir ini untuk membuat sistem ANC yang dapat digunakan untuk meredam atau menghilangkan berbagai jenis suara bising dengan batasan untuk 1 arah rambatan suara.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang menjadi bahasan utama dalam tugas akhir ini:

1. Proses perekaman suara bising
2. Rekonstruksi suara bising dengan amplitude yang sama dan berbeda fasa sebesar 180°

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini:

1. Alat yang dibuat hanya untuk meredam 1 arah rambatan suara
2. Suara bising merupakan gelombang sinus dengan frekuensi 20-600 Hz yang dibangkitkan dengan *signal generator*

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini:

1. Sistem mampu meredam suara bising pada 1 arah rambatan suara
2. Sistem mampu beradaptasi dengan perubahan frekuensi suara bising

1.5 Metodologi

Dalam penyelesaian tugas akhir ini digunakan metodologi sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dasar teori yang mendukung dalam pengerjaan tugas akhir dan penulisan laporan tugas akhir. Dasar teori dapat diambil dari buku-buku, skripsi, tesis, jurnal, artikel – artikel, dan video-video yang dapat diakses melalui internet.

2. Perancangan Perangkat Keras

Pada tahap ini dirancang perangkat keras yang terdiri dari *acoustic duct* untuk 1 arah rambatan suara yang menggunakan pipa PVC, *power amplifier* untuk menggerakkan *speaker*, *pre amplifier* untuk menguatkan sinyal yang didapatkan oleh mikrofon, dan pengkondisi sinyal seperti filter *antialiasing*, filter rekonstruksi, dan *automatic gain controller* sehingga sinyal yang diperoleh lebih mudah untuk diproses. Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan penyesuaian posisi dan letak dari mikrofon referensi dan mikrofon error.

3. Perancangan Perangkat Lunak
Perancangan perangkat lunak meliputi pembuatan *digital signal processing* berupa filter adaptif LMS untuk memproses sinyal referensi dan sinyal error yang telah disampling oleh ADC sehingga mampu meredam suara bising.
4. Pengujian Sistem
Proses pengujian sistem yang akan dilakukan diantaranya adalah pengujian rangkaian *all-pass filter* sebagai sistem ANC, pengujian untuk karakteristik *acoustic duct*, pengujian untuk memeriksa kinerja dari setiap bagian dari blok diagram dan pengujian sistem secara keseluruhan diuji dengan memberikan sinyal sinus dengan frekuensi 20-600 Hz sebagai suara bising.
5. Penulisan Laporan Tugas Akhir
Tahap penulisan laporan adalah tahap akhir dari proses pengerjaan tugas akhir. Isi laporan berisikan hal yang bersangkutan dengan tugas akhir yang dikerjakan. Meliputi pendahuluan, teori penunjang, perancangan sistem, pengujian, dan penutup.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk pembahasan lebih lanjut, laporan tugas akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi pendahuluan yang membahas latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.

BAB II TEORI PENUNJANG

Bab ini berisi teori penunjang dan literatur yang berguna bagi pembuatan tugas akhir ini. Teori penunjang yang diberikan antara lain teori mengenai suara, sistem Active Noise Cancellation, rangkaian power amplifier, rangkaian pre amplifier, rangkaian pengkondisi sinyal, rangkaian *all pass filter*, dan adaptif filter.

BAB III PERANCANGAN SISTEM

Bab ini berisi perencanaan sistem untuk merealisasikan sistem *Active Noise Cancellation* untuk satu arah rambatan suara. Perancangan sistem terdiri dari perancangan perangkat keras, perencanaan perangkat lunak, dan penggabungan kedua bagian tersebut.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

Bab ini berisi hasil pengujian dalam tugas akhir ini, dan disertai beberapa analisa yang berkaitan dengan pengujian yang dilakukan.

BAB V PENUTUP

Penutup yang berisi kesimpulan yang diperoleh dari pembuatan tugas akhir ini, serta saran-saran untuk pengembangan lebih lanjut.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat bermanfaat untuk pengembangan aplikasi sistem ANC secara praktis untuk industri-industri sehingga mampu mengurangi dampak polusi suara bagi para pekerja yang dapat berakibat buruk bagi kesehatan.

BAB II

LANDASAN TEORI

Dalam bab ini akan dibahas teori-teori penunjang dalam membangun sistem *Active Noise Cancellation* untuk satu arah rambatan suara. Pemahaman tentang karakteristik suara diperlukan karena cara rambat suara dan bentuk gelombang suara perlu dianalisa. Beberapa komponen yang diperlukan untuk membangun sistem ANC adalah seperti *power amplifier* sebagai *driver speaker*, *pre-amplifier* digunakan untuk menguatkan sinyal dari mikrofon, *low pass filter* sebagai *antialiasing filter* dan *reconstruction filter*, coupling DC untuk mengkondisikan sinyal berada dalam jangkauan ADC, dan filter adaptif untuk melakukan pemrosesan sinyal digital. Dengan komponen-komponen yang disebutkan di atas, sistem ANC dapat dibangun.

2.1 Suara

2.1.1 Pengertian Suara

Gelombang suara adalah getaran/osilasi yang merambat ke segala arah melalui medium yang dapat berbentuk padat, cair, dan gas dengan kecepatan yang sesuai dengan karakteristik dari bahan [3]. Gelombang suara dapat dihasilkan oleh benda padat yang bergetar dan benda cair yang bergetar. Bentuk gelombang suara dapat berupa gelombang longitudinal maupun transversal yang tergantung pada kondisinya. Gelombang suara dapat menyebabkan fluktuasi pada temperatur, kecepatan, tekanan, dan kerapatan yang dapat diukur. Berikut ini adalah beberapa karakteristik penting dari gelombang suara untuk dapat memahami gelombang suara secara mendalam [5]:

- Amplitudo dari gelombang suara disebabkan oleh perubahan tekanan yang biasanya dinyatakan dalam dB (decibel)
- Panjang gelombang suara merupakan jarak yang dapat ditempuh oleh gelombang suara dalam satu periode
- Frekuensi gelombang suara merupakan banyak gelombang yang terjadi dalam satu detik yang biasanya dinyatakan dalam Hz (Hertz)
- Periode gelombang suara merupakan waktu yang diperlukan untuk satu gelombang penuh

Keempat karakteristik di atas merupakan poin penting untuk dapat memanfaatkan gelombang suara. Selain karakteristik-karakteristik di atas, gelombang suara juga harus dipahami dari respon telinga manusia untuk dapat mendengarkan gelombang suara dengan baik. Gelombang suara yang dapat didengar dengan baik oleh manusia tergantung pada besar amplitude dan frekuensi dari gelombang suara. Frekuensi suara yang dapat didengar oleh manusia adalah 20-20.000 Hz sehingga gelombang suara dapat diklasifikasikan berdasarkan kemampuan pendengaran manusia, yaitu

1. Infrasonik, < 20 Hz, tidak dapat didengar oleh manusia
 2. Audiosonik, 20 – 20.000 Hz, dapat didengar oleh manusia
 3. Ultrasonik, > 20.000 Hz, tidak dapat didengar oleh manusia
- Audiosonik ini juga dibagi menjadi 5 jenis berdasarkan efek suara yang dapat didengar oleh manusia, yaitu:

1. *Low-Bass* (20-80 Hz)
2. *Upper-Bass* (80-320 Hz)
3. *Midrange* (320-2.560 Hz)
4. *Upper Midrange* (2.560 – 5.120 Hz)
5. *Treble* (5.120 – 20.000 Hz)

Spektrum suara mesin industri umum terdiri dari frekuensi suara *Low-Bass*, *Upper-Bass*, *Midrange*, dan *Upper Midrange*.

2.1.2 Decibel (dB)

Decibel merupakan satuan yang umumnya digunakan untuk menyatakan kekerasan dari suara. Sinyal suara dapat dihitung kekerasannya setelah sinyal suara diubah menjadi sinyal listrik. Decibel merupakan satuan logaritmik yang membandingkan dua besaran dimana salah satu besaran sebagai referensi. Persamaan untuk menyatakan suatu besaran dalam decibel:

$$G_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_o}{V_i} \right)$$

dimana:

- G_{dB} : rasio perbandingan (dB)
- V_o : tegangan akhir (Vrms)
- V_i : tegangan awal (Vrms)

2.1.3 Perambatan Suara

Gelombang suara dapat merambat pada medium padat, cair, maupun gas. Kecepatan rambat suara pada tiap medium berbeda-beda. Secara umum kecepatan rambat suara di udara yang bersuhu 20° C adalah 344 m/s. Perubahan suhu udara juga ikut mempengaruhi kecepatan rambat suara. Hubungan antara kecepatan rambat suara dengan suhu udara dapat ditentukan oleh persamaan berikut:

$$v = 332 + 0.6T_c$$

dimana:

v : kecepatan rambat suara(m/s)

T_c : suhu udara (°C)

Perubahan suhu juga mempengaruhi panjang gelombang suara secara tidak langsung. Panjang gelombang suara dengan frekuensi tertentu berubah akibat perubahan kecepatan rambat suara. Hubungan antara kecepatan rambat dari gelombang suara, frekuensi, dan panjang gelombang dapat ditentukan oleh persamaan berikut:

$$v = f \times \lambda$$

dimana:

v : kecepatan rambat dari suara (m/s)

f : frekuensi dari gelombang suara (Hz)

λ : panjang gelombang suara (m)

2.1.4 Gelombang diam

Gelombang diam adalah gelombang yang terbentuk akibat perambatan suara dalam sebuah pipa. Fenomena gelombang diam, yang disebut juga dengan resonansi/gelombang harmonik, terjadi karena panjang gelombang suara bersesuaian dengan panjang pipa. Hal ini menyebabkan gelombang suara yang didengar menjadi lebih besar. Hubungan antara panjang pipa dengan panjang gelombang diam suara dapat dirumuskan sebagai berikut:

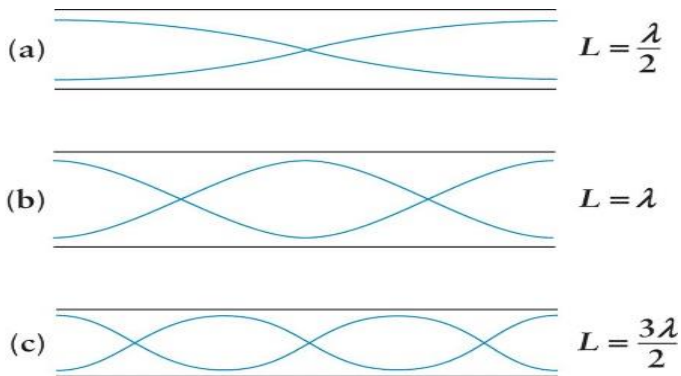
$$\lambda = \frac{2L}{n}$$

dimana:

λ : panjang gelombang suara (m)

L : panjang pipa (m)

n : gelombang harmonik ke- n (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,...)



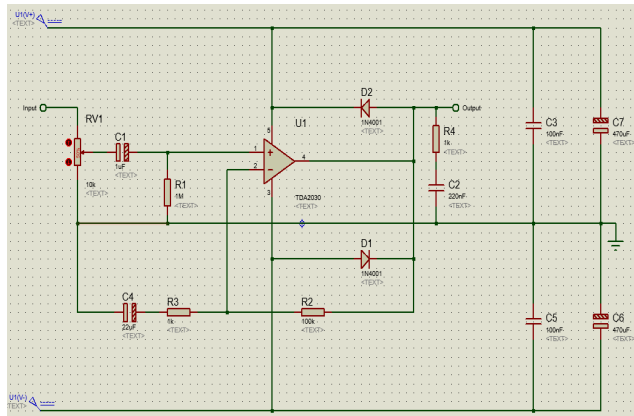
Gambar 2.1 Gelombang diam pada pipa terbuka

2.2 Power Amplifier

Rangkaian *power amplifier* adalah rangkaian penguat yang digunakan untuk menguatkan sinyal listrik audio sehingga dapat digunakan untuk menggerakkan *speaker*. Power amplifier yang paling sering digunakan untuk menggerakkan speaker adalah amplifier kelas A. Amplifier kelas A menguatkan sinyal input dengan fasa $0^\circ - 360^\circ$. Sinyal output yang dihasilkan oleh amplifier kelas ini tidak mengalami distorsi dan tidak terpotong. Kelebihan dari kelas amplifier ini adalah tidak ada informasi yang hilang pada sinyal output, namun efisiensi dari amplifier kelas ini sangatlah rendah yaitu sekitar 25% (maksimum). Terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan dalam mendesain power amplifier untuk *driver speaker*:

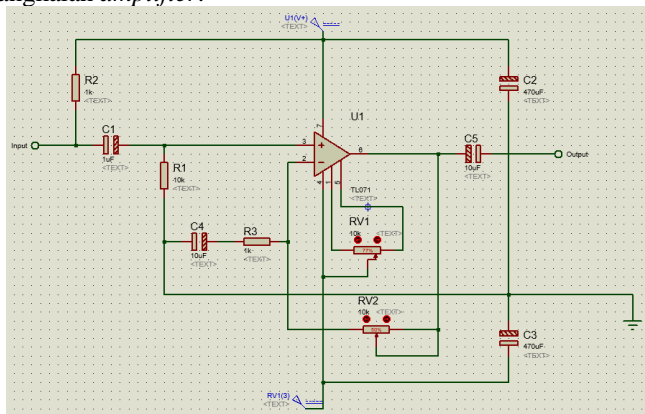
- Spesifikasi dari speaker yang digunakan (daya dan resistansi)
- Spesifikasi dari transistor/ IC operational amplifier yang digunakan seperti *slew rate*, arus output, dan tegangan saturasi dari *power amplifier* yang dibuat
- Daya dari *power supply* yang akan digunakan
- *Bandwidth* dari *power amplifier* harus berada dalam 20-20.000 Hz

Penggunaan *integrated circuit* (IC) *operational amplifier* seperti TDA2030 merupakan rangkaian terintegrasi untuk *power amplifier* yang sederhana. IC ini hampir sama dengan *operational amplifier* pada umumnya, namun desain dari operational ampliifiernya disesuaikan dengan kebutuhan dari sebuah *driver speaker*.



2.3 Pre-Amplifier

Rangkaian *pre-amplifier* digunakan untuk menguatkan sinyal listrik yang didapatkan dari *transducer* atau sensor. Penguatan sinyal listrik pertama ini berguna untuk memudahkan pemrosesan sinyal listrik yang selanjutnya. Rangkaian *pre-amplifier* ini dapat menggunakan transistor BJT, FET, dan *operational amplifier*. Rangkaian *pre-amplifier* dengan menggunakan *operational amplifier* paling banyak digunakan karena rangkaiannya sederhana dan sangat mudah untuk mengatur penguatan dari rangkaian *amplifier*.

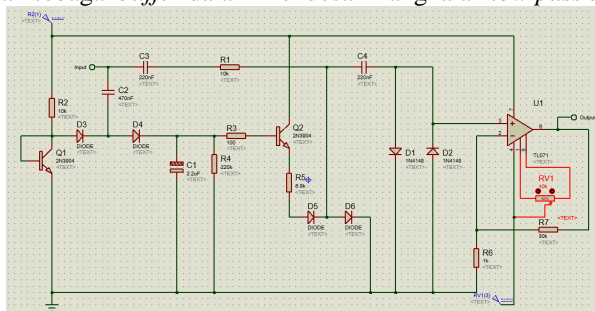


2.4 Automatic Gain Controller

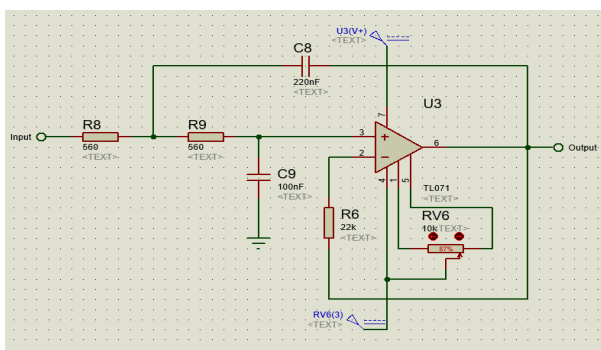
Automatic gain controller (gambar 2.4) berfungsi untuk menghasilkan sinyal dengan besar output yang constant. *Amplifier* ini akan menyesuaikan gain dari rangkaianannya sesuai dengan besar tegangan input. Cara kerja dari rangkaian ini adalah dengan melemahkan sinyal yang masuk pada suatu besaran tegangan yang konstan. Besar tegangan yang konstan ini kemudian dikuatkan sehingga amplitudo sinyal output menjadi konstan.

2.5 Low Pass Filter

Low pass filter (gambar 2.5) berguna untuk menyaring sinyal-sinyal listrik dengan frekuensi rendah dan menekan amplitudo sinyal-sinyal listrik dengan frekuensi tinggi. *Operational amplifier* umumnya juga digunakan sebagai *buffer* dalam mendesain rangkaian *low pass amplifier*.



Gambar 2.4 Automatic gain controller



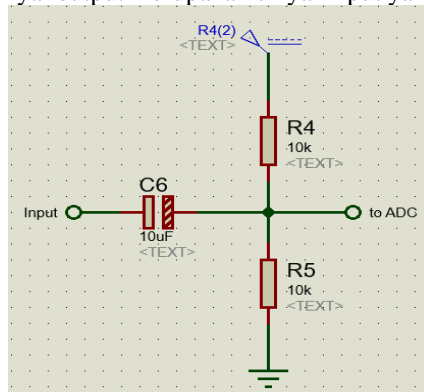
Gambar 2.5 -40 dB/decade low pass filter

2.6 Coupling DC

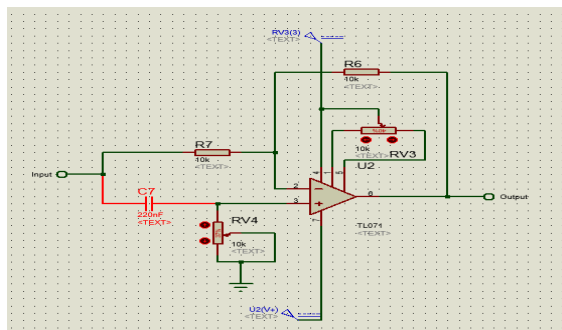
Rangkaian pengkondisi sinyal ini digunakan untuk mengkondisikan suatu sinyal sehingga sinyal listrik berada dalam jangkauan ADC. Rangkaian ini terdiri dari kapasitor elektrolit dan resistor. Kapasitor berfungsi menambahkan tegangan DC pada sinyal AC. Kedua nilai resistor yang digunakan harus sama besar sehingga sinyal tidak mengalami distorsi. Diagram skema *coupling* DC dapat dilihat pada gambar 2.6

2.7 All-pass Filter

Rangkaian *all-pass filter* (gambar 2.7) hanya meneruskan sinyal yang masuk dan merubah fasa dari sinyal yang masuk. Perubahan fasa ini menyebabkan sinyal output merupakan sinyal input yang tertunda.



Gambar 2.6 Coupling DC



Gambar 2.7 All-Pass filter

2.8 Transformasi Z

Transformasi Z merupakan suatu alat bantu untuk menganalisa sinyal dan sistem waktu diskrit. Transformasi Z merubah sinyal atau sistem dalam domain waktu diskrit menjadi domain Z. Berikut ini adalah persamaan dari transformasi Z:

$$X(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)z^{-k}$$

Transformasi Z dapat digunakan untuk mempermudah pengolahan sinyal. Dengan menggunakan transformasi Z, proses konvolusi antara sinyal dengan respon filter menjadi proses perkalian dalam domain Z. Hal ini merupakan salah satu sifat dari transformasi Z yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Y(z) = X(z) * H(z)$$

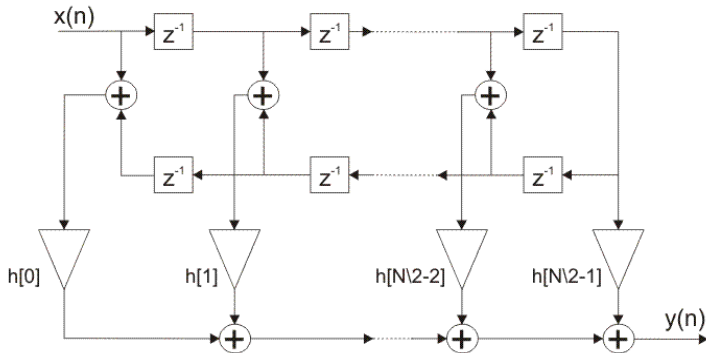
Dengan mengubah domain waktu dari sinyal dan respon filter menjadi domain Z dengan menggunakan transformasi Z, proses konvolusi antara sinyal dengan filter menjadi lebih mudah. Alasan lain yang mendukung bahwa transformasi Z mempermudah dalam pengolahan sinyal digital adalah z^{-1} merupakan notasi *delay* sebesar 1 *clock* dalam program sehingga lebih mudah untuk diimplementasikan pada program dan persamaan respon filter atau sinyal yang telah ditransformasi ke dalam domain Z mudah untuk dipahami.

2.9 Finite Impulse Response Filter

Finite Impulse Response (FIR) filter merupakan *feed-forward* filter sehingga output hanya bergantung pada input yang terkait. Output filter sebelumnya tidak mempengaruhi output filter selanjutnya. Berikut ini adalah persamaan FIR filter yang ada:

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b_k x[n - k]$$

Untuk mengimplementasikan FIR filter pada program C++ diperlukan 3 fungsi dasar seperti *adder*, *multiplier*, dan *signal delay*. Variabel-variabel yang diperlukan adalah *input*, *output*, orde filter, dan koefisien filter. *Adder* digunakan untuk melakukan operasi penambahan. *Multiplier* digunakan untuk melakukan operasi perkalian. *Signal delay* digunakan untuk menunda sinyal input yang masuk. Blok diagram dari FIR filter dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Blok diagram FIR filter

2.10 Filter Adaptif dan Algoritma *Least Mean Square*

Filter adaptif merupakan filter digital yang dapat beradaptasi dengan kondisi input maupun error. Filter digital yang digunakan untuk membangun filter digital ini dapat berupa filter FIR dan/atau filter IIR. Salah satu algoritma yang dapat digunakan untuk mengadaptasi koefisien dari filter digital adalah algoritma *Least Mean Square* (LMS). Algoritma *Least Mean Square* (LMS) digunakan untuk memperbaharui koefisien dari filter digital. Algoritma ini pertama kali diperkenalkan oleh Widrow dan Hoff pada tahun 1975 yang digunakan untuk proses pembelajaran. Persamaan LMS yang digunakan untuk memperbaharui koefisien filter dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu[e(n)\mathbf{x}(n)]$$

dimana:

- $\mathbf{w}(n+1)$: matriks koefisien filter yang akan datang
- $\mathbf{w}(n)$: matriks koefisien filter saat ini
- μ : *Adaptation step size*
- $\mathbf{x}(n)$: matriks input referensi saat ini
- $e(n)$: input error saat ini

Harga dari μ menentukan seberapa cepat error sinyal dapat konvergen. Semakin besar harga μ maka filter akan semakin cepat konvergen, namun dapat menyebabkan osilasi karena *step size* yang terlalu besar. Harga dari μ yang kecil dapat meminimalkan efek osilasi namun filter adaptif lambat untuk mencapai titik konvergennya. Filter adaptif dapat digunakan untuk menekan *random noise* dari suatu sinyal listrik pada suatu sistem. Selain untuk meredam *random noise*, filter

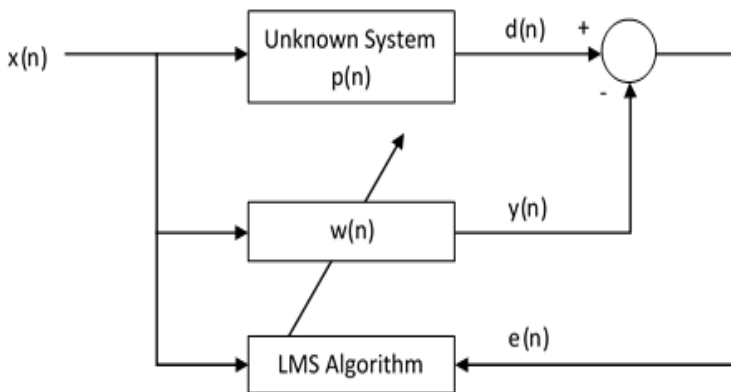
adaptif juga dapat digunakan untuk *path modelling*. Filter adaptif akan mengadaptasi nilai koefisien filternya sehingga respon dari filter akan mendekati respon dari keadaan lingkungan sebenarnya.

Gambar 2.9 merupakan blok diagram yang menunjukkan cara kerja dari filter adaptif LMS. Secara umum cara kerja dari filter adaptif LMS adalah menyesuaikan output $y(n)$ dengan input $x(n)$ agar sesuai dengan sinyal *desired* $d(n)$. Sinyal $d(n)$ merupakan sinyal noise yang ingin dihilangkan atau diredam. Jika error yang terjadi sudah mendekati nol, maka respon filter $w(n)$ akan hampir sama dengan respon dari sistem yang tidak diketahui tersebut.

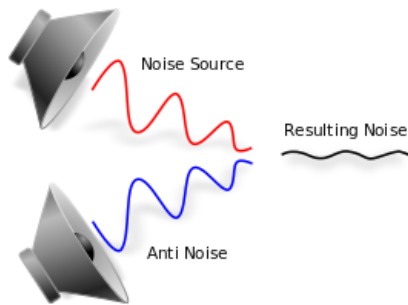
2.11 Active Noise Cancellation

Untuk dapat meredam suara yang tidak diinginkan terdapat 2 cara, yaitu aktif dan pasif. Teknik peredaman suara pasif dilakukan dengan menggunakan material kedap suara seperti busa dan karpet. Material kedap suara ini sangat efektif untuk meredam suara bising dengan frekuensi yang tinggi, namun kurang efektif untuk suara dengan frekuensi yang rendah. Peredaman suara dengan frekuensi rendah dilakukan dengan bantuan alat elektronik aktif. Teknik yang lebih dikenal sebagai *Active Noise Cancellation* (ANC).

Prinsip ANC adalah dengan mengeluarkan gelombang suara bising dengan amplitude yang sama, tetapi dengan perbedaan fasa sebesar 180° . Gelombang suara ini dapat disebut sebagai suara sekunder. Perbedaan fasa antara suara sumber dan suara sekunder inilah yang menyebabkan suara menjadi teredam.



Gambar 2.9 Blok Diagram filter adaptif LMS



Gambar 2.10 *Active Noise Cancellation*

Sistem ANC untuk satu arah rambatan umumnya tersusun atas 2 buah mikrofon (mikrofon referensi dan mikrofon error) dan 1 buah *speaker*. Menurut Xiaojun Qiu, Jing Lu, dan Jie Pan, ada beberapa langkah yang harus dipersiapkan untuk membangun sebuah sistem ANC [6]:

1. Melakukan analisa fisika terhadap lingkungan
2. Menentukan performansi optimum dengan strategi kontrol
3. Menguji coba sistem dengan berbagai kondisi
4. Mengimplementasikan *real-time controller*

Selain itu, performansi dari sistem ANC yang dibuat dapat ditingkatkan dengan memanipulasi lingkungan.

Salah satu contoh sistem ANC untuk satu arah rambatan suara adalah sistem ANC pada *acoustic duct*. Sistem ANC untuk *acoustic duct* ini harus memperhatikan beberapa hal, yaitu:

- Orde filter digital adaptif dan *time sampling*
Orde dari filter digital adaptif dan *time sampling* haruslah disesuaikan untuk *path-modelling* dari *secondary path acoustic duct*. Hubungan antara panjang *path modelling* yang dapat dimodelkan, orde filter, dan *time sampling* dapat dituliskan pada persamaan di bawah ini:

$$l = N\Delta_s = \frac{Nc_o}{f_s}$$

dimana:

l : panjang maksimum yang dapat dimodelkan oleh filter

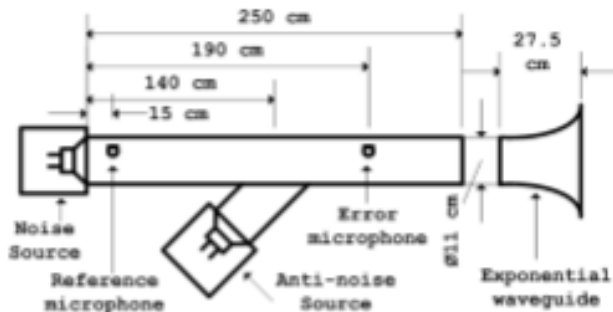
N : orde filter digital

c_o : Kecepatan suara pada medium udara

f_s : Frekuensi sampling

- Peletakkan sensor pada *acoustic duct*
Peletakkan mikrofon harus sedemikian rupa agar tidak menimbulkan *turbulence* pada *acoustic duct*. *Turbulence* yang terjadi pada *acoustic duct* dapat mempengaruhi tekanan udara yang ada dalam *acoustic duct*.
- Kausalitas
Sistem ANC akan kausal jika besar *delay* sinyal suara akibat rangkaian elektrik lebih kecil dari *delay* akibat perambatan suara.
- *Automatic gain controller*
Akibat efek gelombang diam, sinyal listrik dari mikrofon akan memiliki amplitudo yang berbeda-beda untuk frekuensi yang berbeda-beda juga. Besar amplitudo yang berbeda-beda ini berpengaruh pada efektifitas dari sistem ANC.
- *Antialiasing* dan *reconstruction analog filter*
Filter ini digunakan untuk merekonstruksi sinyal dan mencegah terjadinya aliasing terhadap frekuensi sinyal yang diinginkan.

Desain dari *acoustic duct* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2.11. Sistem ANC dalam *acoustic duct* ini menggunakan filter adaptif LMS yang diimplementasikan pada TMS320C6701 EVM evaluation module dari Texas Instruments.



Gambar 2.11 Desain *acoustic duct* [1]

BAB III

PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini akan dibahas perancangan sistem ANC untuk satu arah rambatan suara, seperti blok diagram, desain *acoustic duct*, desain fungsi dari tiap komponen dari blok diagram, *flowchart* program mikrokontroler, dan *flowchart* dari filter adaptif yang digunakan.

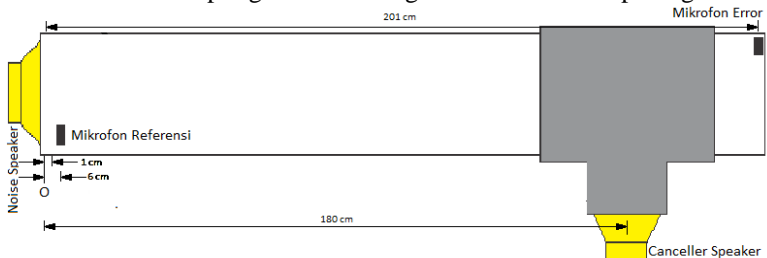
3.1 Sistem Active Noise Cancellation untuk Satu Arah Rambatan Suara

3.1.1 Perancangan Acoustic Duct

Desain *acoustic duct* dari sistem ANC untuk satu arah rambatan suara menggunakan pipa PVC berdiameter 11 cm dengan panjang ± 2 m. Hal ini bertujuan untuk memastikan suara hanya merambat ke satu arah saja. Desain dari *acoustic duct* dapat dilihat dari gambar 3.1. *Noise speaker* terletak sejauh 1 cm dari titik O yang terlihat pada gambar, sedangkan *canceller speaker* terletak sejauh 180 cm dari titik O. Mikrofon referensi terletak sejauh 6 cm dari titik O dan mikrofon error terletak sejauh 201 cm dari titik O. Spesifikasi dari *acoustic duct* ini dimanfaatkan untuk mempertimbangkan orde dari filter digital adaptif dan frekuensi sampling yang akan digunakan. Dengan persamaan yang telah dijelaskan pada bab 2.10.

$$l = \frac{Nc_o}{f_s}$$

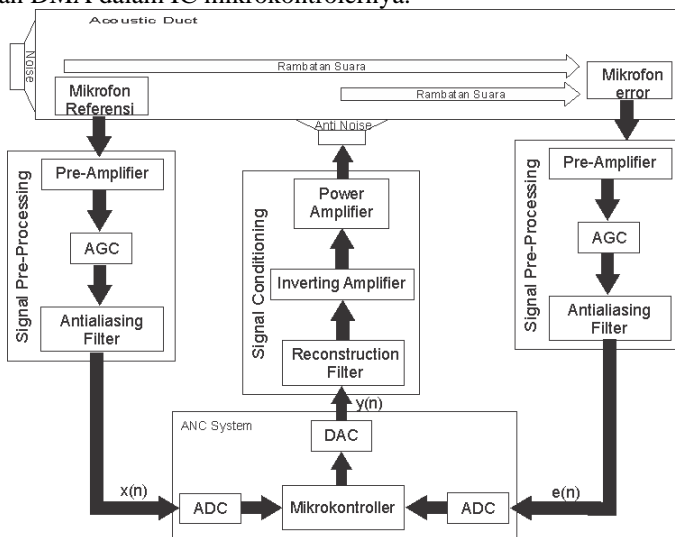
Jika orde filter digital adalah 32 dan frekuensi sampling yang akan digunakan adalah 4000 Hz, maka jarak maksimum yang dapat dimodelkan oleh filter adaptif adalah 2.72 m dengan asumsi kecepatan suara adalah 340 m/s. Karena jarak maksimum yang dapat dimodelkan lebih besar dibandingkan dengan panjang pipa maka frekuensi sampling 4000 Hz dengan orde filter 32 dapat digunakan.



Gambar 3.1 Rancangan *acoustic duct*

3.1.2 Blok Diagram Sistem *Active Noise Cancellation* untuk Satu Arah Rambatan Suara

Diagram blok keseluruhan dari sistem ANC pada *acoustic duct* ini dapat dilihat dari gambar 3.2. Suara bising yang terdapat pada *acoustic duct* akan ditangkap oleh mikrofon referensi. Suara bising yang terakumulasi dengan suara *anti noise* akan ditangkap oleh mikrofon error. Sinyal listrik yang dihasilkan mikrofon selanjutnya dikuatkan dengan *pre-amplifier* dan *automatic gain controller* (AGC). Untuk mencegah terjadinya *aliasing* pada ADC, sinyal terlebih dahulu difilter dengan *antialiasing* filter. Sinyal selanjutnya disampling dan diproses secara digital di mikrokontroler. Sinyal hasil pemrosesan secara digital selanjutnya dikeluarkan dengan menggunakan DAC dan direkonstruksi secara halus dengan *reconstruction filter*. Sinyal selanjutnya dibalik dengan menggunakan *inverting amplifier* dengan pengutan rangkaian sebesar 1. Kemudian sinyal keluaran dari *inverting amplifier* akan dikuatkan oleh *power amplifier* sehingga dapat dikeluarkan ke *acoustic duct* oleh speaker. Mikrokontroler yang digunakan untuk sistem ANC yang dibuat adalah *board* STM32F4 Discovery. *Board* mikrokontroler ini sudah memiliki ADC, DAC, dan DMA dalam IC mikrokontrolernya.



Gambar 3.2 Diagram blok sistem ANC pada *acoustic duct*

3.1.3 Flowchart Program Active Noise Cancellation

Sistem ANC yang dibuat haruslah memiliki 2 tahap agar sistem ANC yang dibuat dapat bekerja dengan baik. Tahap pertama merupakan tahap yang berfungsi untuk memodelkan *secondary path* dengan menggunakan filter adaptif yang disebut dengan $c(n)$. Tahap ini digunakan untuk mengurangi efek jarak dari *canceller speaker* hingga mikrofon error. Tahap kedua merupakan tahap *noise cancelling* pada *acoustic duct* dengan sinyal sinus sebagai suara bising.

Program diawali dengan melakukan inisialisasi untuk komponen ADC, DAC, DMA, timer, variabel-variabel, dan fungsi-fungsi yang akan digunakan pada STM32F4-Discovery.

Tahap pertama dilakukan dengan mengeluarkan *white noise* pada *canceller speaker* dan menangkap sinyal suara yang dikeluarkan oleh *canceller speaker* dengan mikrofon error. Selanjutnya koefisien filter $c(n)$ akan diperbaharui agar filter adaptif $c(n)$ memrepresentasikan *secondary path* dengan menggunakan algoritma LMS. *Adaptation step size* yang digunakan untuk pemodelan *secondary path* adalah 0.005. Berikut ini adalah persamaan untuk *update* koefisien filter:

$$c(n+1) = c(n) + \mu[e(n)x(n)]$$

dimana:

$c(n)$: matriks koefisien filter adaptif pada waktu ke- n

$x(n)$: matriks input pada waktu ke- n

$e(n)$: error pada waktu ke- n

Filter adaptif $c(n)$ ini bertujuan untuk mengompensasi error yang akan terjadi akibat jarak antara mikrofon error dengan *canceller speaker*. Blok diagram dari program untuk *secondary path modelling* dapat dilihat pada gambar 3.3.

Tahap kedua merupakan tahap *noise cancelling*. Sinyal yang ditangkap oleh mikrofon referensi akan dikonvolusikan dengan filter adaptif $w(n)$. Selain itu, sinyal referensi ini juga akan dikonvolusikan dengan filter adaptif $c(n)$. Koefisien filter adaptif $w(n)$ diperbaharui dengan menggunakan hasil konvolusi sinyal referensi dengan filter adaptif $c(n)$ dan sinyal dari mikrofon error dengan menggunakan algoritma FxLMS. *Adaptation step size* yang digunakan untuk *noise cancelling* adalah 0.0005. Persamaan untuk *update* koefisien filter adaptif $w(n)$:

$$w(n+1) = w(n) + \mu[e(n)x'(n)]$$

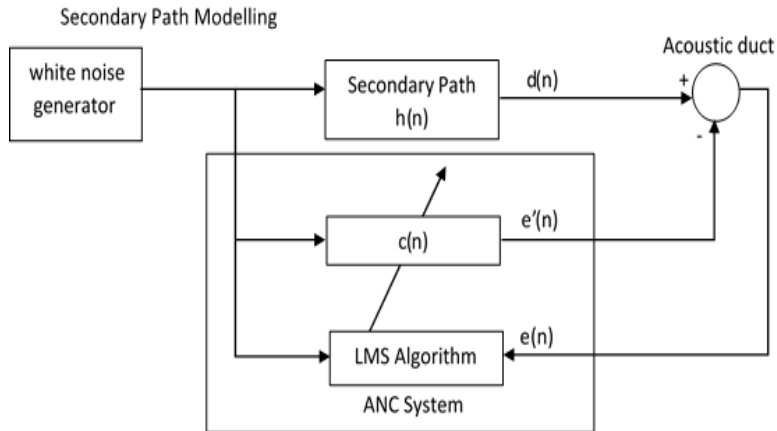
dimana:

$\mathbf{w}(n)$: matriks koefisien filter adaptif pada waktu ke- n

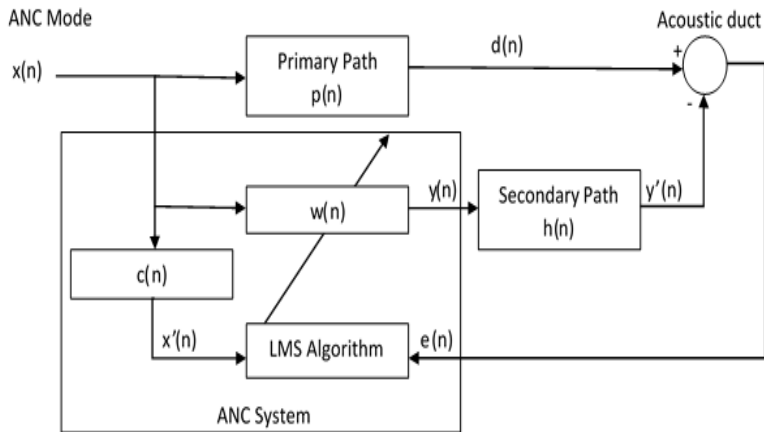
$\mathbf{x}'(n)$: matriks output filter estimator pada waktu ke- n

$e(n)$: error pada waktu ke- n

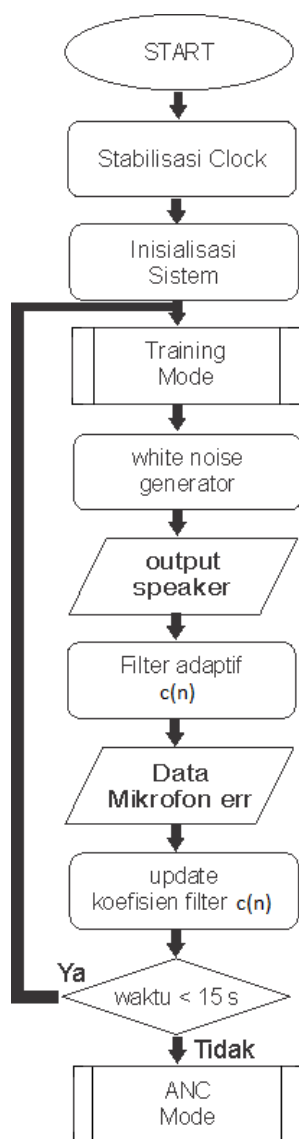
Penjelasan mengenai desain dari filter adaptif FxLMS akan dibahas lebih jelas pada subbab 3.3. Cara kerja dari kedua tahap program dapat dilihat pada gambar 3.3 dan 3.4. Untuk flowchart dari program dapat dilihat pada gambar 3.5 dan 3.6.



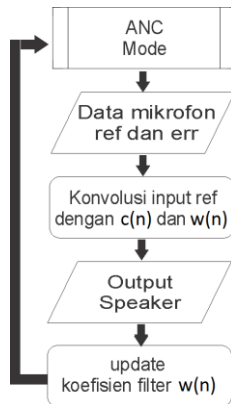
Gambar 3.3 Blok diagram program *secondary path modelling*



Gambar 3.4 Blok diagram program ANC



Gambar 3.5 Flowchart training mode



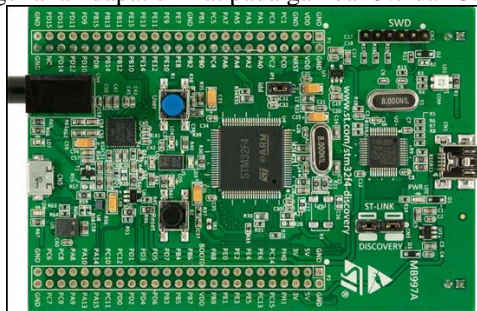
Gambar 3.6 Flowchart ANC mode

3.2 Komponen Penyusun Sistem Active Noise Cancellation

Komponen-komponen penting penyusun sistem ANC yang akan diperlukan seperti mikrokontroler STM32F4-Discovery, *power amplifier*, *pre-amplifier*, *automatic gain controller*, *antialiasing* dan *reconstruction filter*, dan *all-pass filter*.

3.2.1 STM32F4-Discovery

STM32F4-Discovery merupakan *board* mikrokontroler berbasis STM32F407VGT6. *Board* mikrokontroler ini memiliki kecepatan *clock* hingga 168 MHz. Selain itu, *board* mikrokontroler ini juga didukung oleh ARM® Cortex®-M4 32-bit core sehingga membuat *board* mikrokontroler ini cocok digunakan untuk *digital signal processing*. Gambar dan spesifikasi dari *board* STM32F4 yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.7 dan 3.8.



Gambar 3.7 STM32F4-Discovery

Key Features

- STM32F407VGT6 microcontroller featuring 32-bit ARM Cortex-M4F core, 1 MB Flash, 192 KB RAM in an LQFP100 package
- On-board ST-LINK/V2 with selection mode switch to use the kit as a standalone ST-LINK/V2 (with SWD connector for programming and debugging)
- Board power supply: through USB bus or from an external 5 V supply voltage
- External application power supply: 3 V and 5 V
- LIS302DL or LIS3DSH ST MEMS 3-axis accelerometer
- MP45DT02, ST MEMS audio sensor, omni-directional digital microphone
- CS43L22, audio DAC with integrated class D speaker driver
- Eight LEDs:
- LD1 (red/green) for USB communication
- LD2 (red) for 3.3 V power on
- Four user LEDs, LD3 (orange), LD4 (green), LD5 (red) and LD6 (blue)
- 2 USB OTG LEDs LD7 (green) VBus and LD8 (red) over-current
- Two push buttons (user and reset)
- USB OTG FS with micro-AB connector
- Extension header for all LQFP100 I/Os for quick connection to prototyping board and easy probing

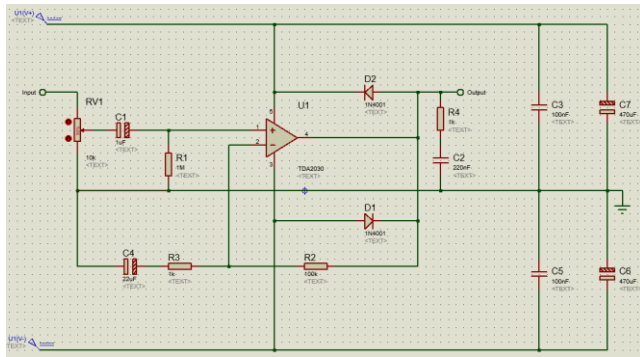
Gambar 3.8 Spesifikasi dari STM32F4 Discovery

Pada mikrokontroler ini terdapat *built-in* ADC, DAC, DMA, dan timer yang berguna untuk membangun sistem ANC ini. Pemrograman mikrokontroler ini dilakukan dengan menggunakan program CooCox pada Windows.

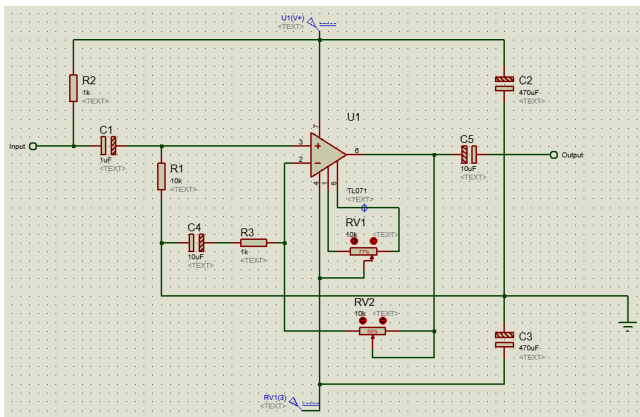
3.2.2 Power Amplifier, Pre-Amplifier, dan Automatic Gain Controller

Power Amplifier yang digunakan dibuat dengan menggunakan *integrated circuit* (IC) TDA2030. Rangkaian *power amplifier* yang digunakan untuk tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar 3.9. *Power amplifier* digunakan untuk menguatkan sinyal agar dapat menggerakkan *speaker*. Penguatan dari *power amplifier* yang dibuat adalah 100x yang ditentukan dengan nilai dari resistor R2.

Pre-amplifier yang digunakan menggunakan IC *operational amplifier* (op amp) TL071 dengan rangkaian yang dapat dilihat pada gambar 3.10. Gain dari rangkaian ini dapat diatur dengan mengatur nilai RV2. Gain yang dapat diatur ini bertujuan agar dapat menyesuaikan besar sinyalnya agar dapat disampling dengan baik oleh ADC.



Gambar 3.9 Power amplifier dengan TD2030



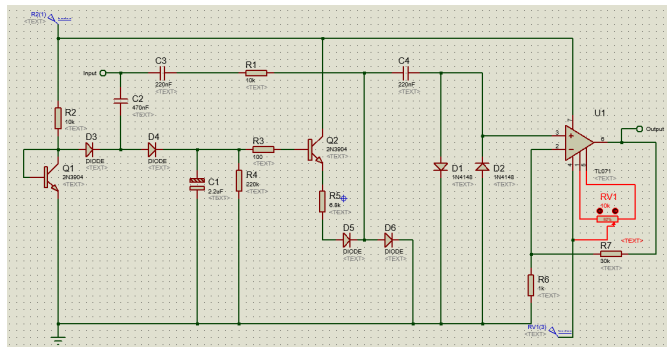
Gambar 3.10 Pre-amplifier dengan TL071

Automatic gain controller (AGC) ditambahkan karena adanya efek gelombang diam pada *acoustic duct* yang menyebabkan perbedaan besar amplitudo pada frekuensi yang berbeda. Akibatnya sistem ANC menjadi tidak efektif pada frekuensi dimana sinyal ditangkap memiliki amplitudo terkecil. Rangkaian AGC ini memiliki 2 bagian yaitu *attenuator* dan *amplifier*. *Attenuator* berfungsi untuk menekan sinyal hingga level tertentu yang relatif konstan pada amplitudo yang berbeda-beda. Besar amplitudo yang konstan ini selanjutnya dikuatkan sehingga menghasilkan AGC

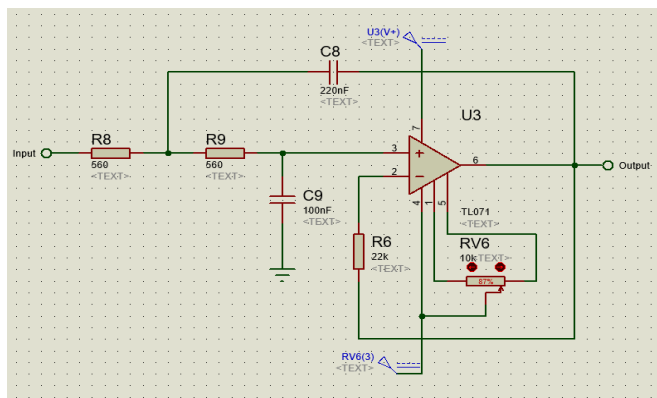
yang memiliki output yang konstan. Rangkaian AGC dapat dilihat pada gambar 3.11.

3.2.3 Antialiasing dan Reconstruction Filter

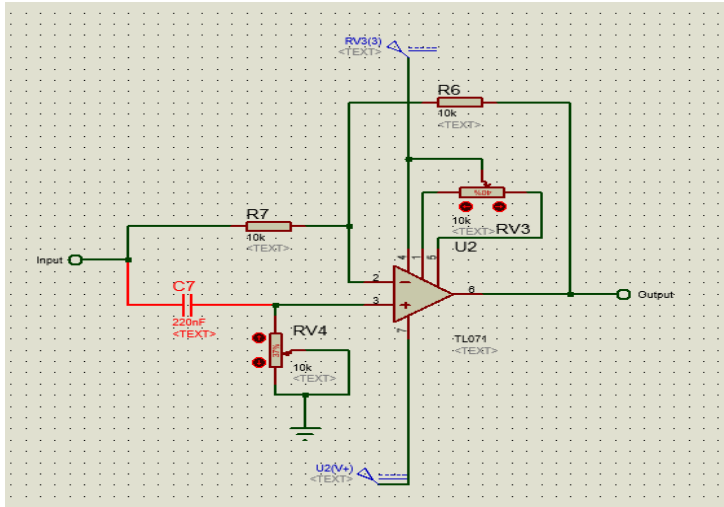
Antialiasing filter dan *reconstruction filter* yang digunakan untuk tugas akhir ini didesain dengan *cut off* pada 2000 Hz. Hal ini disesuaikan dengan *sampling rate* yang digunakan yaitu 4000 Hz. Filter yang digunakan merupakan filter *Butterworth* orde kedua karena *delay* dari filter berorde tinggi sangat besar. *Delay* yang besar ini dapat mempengaruhi kestabilan dari sistem. Rangkaian dari *anti-aliasing filter* dan *reconstruction filter* dapat dilihat pada gambar 3.12.



Gambar 3.11 AGC



Gambar 3.12 -40 dB/decade low pass filter



Gambar 3.13 All-pass filter

3.2.4 All-Pass Filter

Rangkaian *all-pass filter* yang digunakan untuk tugas akhir ini didesain agar dapat menunda sinyal analog. Rangkaian dari *all-pass filter* yang digunakan dapat dilihat pada gambar. Penggunaan resistor variabel pada menyebabkan *delay* pada sinyal dapat diatur secara manual. Rangkaian ini digunakan untuk membuktikan efek peredaman dan/atau penguatan akibat perbedaan fasa gelombang suara. Untuk rangkaian *all-pass filter* dapat dilihat pada gambar 3.13. Rangkaian *all-pass filter* yang digunakan berjumlah 2 buah yang disusun secara *cascade*. Rangkaian *all-pass filter* yang kedua diberi resistor variabel yang bertujuan untuk mengatur *gain* dari sinyal yang akan direkonstruksi. Gambar rangkaian selengkapnya terlampir pada lampiran.

3.3 Filter Adaptif Filtered-x Least Mean Square

Filter adaptif merupakan bagian terpenting dari sistem ANC. Filter adaptif ini digunakan untuk *secondary path modelling* dan *noise cancelling*. Filter adaptif yang dibuat merupakan filter *Finite Impulse Response* (FIR) yang koefisiennya diupdate dengan menggunakan algoritma *Filtered-x Least Mean Square* (FxLMS). Orde FIR filter yang

digunakan pada sistem ini adalah 32 dengan frekuensi sampling 4 kHz. 32 koefisien dari FIR filter dibangkitkan dengan fungsi *random generator* dari -1,00 hingga 1,00. Untuk *flowchart* filter adaptif dapat dilihat pada gambar 3.12. Berikut ini adalah persamaan matematis dari FIR filter $w(n)$:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{31} w_k(n) x(n-k)$$

$$y(n) = w_0(n) x(n) + w_1(n) x(n-1) + \dots + w_{31}(n) x(n-31)$$

Jika:

$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ w_2(n) \ w_3(n) \ \dots \ w_{31}(n)]$$

$$\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ x(n-2) \ x(n-3) \ \dots \ x(n-31)]$$

dimana:

$\mathbf{x}(n)$: input referensi pada sampel ke- n

$\mathbf{x}(n-1)$: input referensi pada 1 sampel sebelum

$\mathbf{x}(n-2)$: input referensi pada 2 sampel sebelum

dan begitu seterusnya.

$\mathbf{w}_0(n)$: koefisien filter $w(n)$ yang ke 0 untuk sampel ke- n

$\mathbf{w}_1(n)$: koefisien filter $w(n)$ yang ke 1 untuk sampel ke- n

$\mathbf{w}_2(n)$: koefisien filter $w(n)$ yang ke 2 untuk sampel ke- n

dan begitu seterusnya.

maka persamaan filter dapat dituliskan dengan persamaan di bawah ini:

$$y(n) = \mathbf{w}(n) * \mathbf{x}^T(n)$$

Dimana n merupakan sampel masukkan ke- n . Persamaan matematis di atas juga digunakan untuk merancang FIR filter adaptif $c(n)$. Persamaan yang digunakan untuk melakukan *update* koefisien filter $c(n)$ saat *secondary path modelling* berbeda dengan persamaan untuk melakukan *update* koefisien filter $w(n)$. Berikut ini adalah persamaan untuk *update* koefisien filter $c(n)$ dengan *adaptation step size* 0,005:

$$\mathbf{c}(n+1) = \mathbf{c}(n) + \mu[\mathbf{e}(n)\mathbf{x}(n)]$$

dimana:

$\mathbf{c}(n)$: matriks koefisien filter adaptif pada waktu ke- n

$\mathbf{x}(n)$: matriks input pada waktu ke- n

$\mathbf{e}(n)$: error pada waktu ke- n

Sedangkan persamaan untuk *update* koefisien filter $w(n)$ dengan *adaptation step size* 0,0005:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu[\mathbf{e}(n)\mathbf{x}'(n)]$$

dimana:

$\mathbf{w}(n)$: matriks koefisien filter adaptif pada waktu ke- n

$\mathbf{x}'(n)$: matriks output filter estimator pada waktu ke- n

$\mathbf{e}(n)$: error pada waktu ke- n

$\mathbf{x}'(n)$ merupakan matriks hasil konvolusi antara $\mathbf{x}(n)$ dengan $\mathbf{c}(n)$ dengan ukuran 1×32 yang dapat dituliskan persamaan matematisnya sebagai berikut:

$$\mathbf{x}'(n) = [x'(n) \ x'(n-1) \ x'(n-2) \ x'(n-3) \ \dots \ x'(n-31)]$$

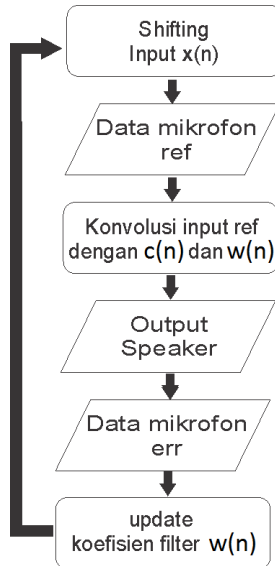
dimana:

$\mathbf{x}'(n)$: hasil konvolusi $\mathbf{x}(n)$ dan $\mathbf{c}(n)$ pada sampel ke- n

$\mathbf{x}'(n-1)$: hasil konvolusi $\mathbf{x}(n)$ dan $\mathbf{c}(n)$ pada 1 sampel sebelum

$\mathbf{x}'(n-2)$: hasil konvolusi $\mathbf{x}(n)$ dan $\mathbf{c}(n)$ pada 2 sampel sebelum dan begitu seterusnya.

Flowchart filter adaptif FxLMS untuk ANC mode dapat dilihat pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Flowchart filter adaptif FxLMS untuk ANC mode

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

Pada bab ini akan dibahas alat ukur yang digunakan, proses, hasil, dan analisa pengujiannya. Pengujian-pengujian yang dilakukan diantaranya adalah fenomena gelombang suara pada *acoustic duct*, *active noise cancelling* dengan penggeser fasa menggunakan *all-pass filter*, pengujian *automatic gain controller*, dan *active noise cancellation* dengan filter adaptif FxLMS.

4.1 Alat ukur yang digunakan

Proses pengujian yang dilakukan membutuhkan instrumentasi yang digunakan untuk menentukan kelayakan dari sistem atau alat yang telah dibuat. Berikut ini adalah spesifikasi alat ukur atau instrumentasi yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini:

- Multimeter digital Sanwa CD800a (gambar 4.1) merupakan multimeter yang dapat digunakan untuk mengukur tegangan hingga 600 V (DC/AC), arus hingga 400 mA (DC/AC), resistansi, kapasitansi, *continuity test*, dan *frequency counter*. Pada proses pengujian, alat ukur ini digunakan untuk mengukur tegangan dan resistansi.
- Osiloskop BK Precision 2542B 100 MHz (gambar 4.2) merupakan instrumentasi yang digunakan untuk melihat grafik tegangan terhadap waktu. Osiloskop ini memiliki beberapa fungsi matematika yang berguna untuk pengujian-pengujian yang dilakukan pada tugas akhir ini, seperti *Fast Fourier Transform*.



Gambar 4.1 Multimeter digital Sanwa CD800a



Gambar 4.2 Osiloskop BK precision 2542B 100 MHz



Gambar 4.3 Alat ukur panjang

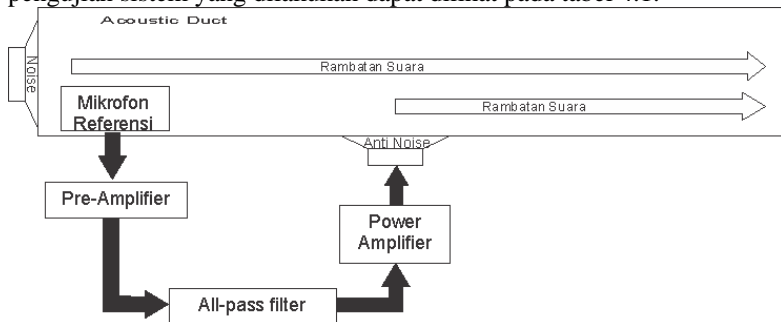
- Alat ukur panjang (gambar 4.3). Alat ukur ini digunakan untuk melakukan pembuatan *acoustic duct* dan mengukur posisi speaker *noise*, speaker *canceller*, mikrofon error, dan mikrofon referensi di dalam pipa PVC.
- Decibel meter Wintact WT-1357 (gambar 4.4) adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur tingkat kekerasan suara dalam dB. Alat ukur ini menggunakan mikrofon untuk mengukur kekerasan dari suara.



Gambar 4.4 dB meter

4.2 Pengujian *Active Noise Cancelling* dengan Penggeser Fasa menggunakan *All-Pass Filter*

Untuk mengetahui pengaruh akumulasi suara yang berbeda fasa, sistem ANC dibentuk dengan menggunakan *all-pass filter* yang digunakan sebagai penggeser fasa gelombang suara. Blok diagram sistem ANC dengan menggunakan *all-pass filter* dapat dilihat pada gambar 4.5. Pengujian dilakukan dengan menggunakan sinyal suara sinus dari frekuensi 20-600 Hz dengan amplitudo 1,5 Vpp. Kemudian menyesuaikan besar resistor variabel dari 2 *all-pass filter* yang disusun secara cascade untuk menyesuaikan fasa dari sinyal suara yang akan direkonstruksi agar terjadi peredaman suara yang paling maksimal. Hasil pengujian sistem yang dilakukan dapat dilihat pada tabel 4.1.



Gambar 4.5 Blok diagram sistem ANC dengan *all-pass filter*

Tabel 4.1 Peredaman sistem ANC dengan *all-pass filter*

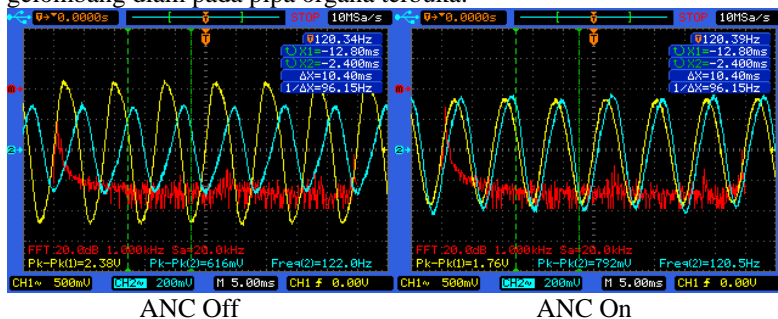
Frekuensi	ANC On(dB)	ANC Off(dB)
20	52.5	52.9
40	57.3	57.3
60	63.3	64.4
80	68.1	69.7
100	71.6	72.5
120	76.3	80.8
140	82.3	85.9
160	83.3	83.7
180	82.6	83.1

Frekuensi	ANC On (dB)	ANC Off (dB)
200	86.5	87.6
220	90.8	93.9
240	90.8	91.7
260	89	89.2
280	89.7	89.7
300	93.8	93.9
320	95.2	95.4
340	92.4	92.4
360	92.1	92.1
380	97.1	97.1
400	100.2	100.2
420	94.6	94.8
440	93	93
460	97.4	98.1
480	97.2	100.3
500	93	95.2
520	93.2	94.2
540	97.1	97.1
560	102.3	103.8
580	98.2	98.8
600	93.2	93.9

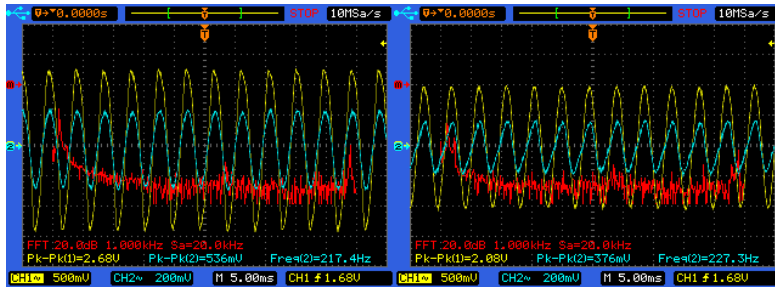
Hasil plot level suara terhadap frekuensi dapat dilihat pada gambar 4.11. Dari tabel dapat dilihat bahwa sistem dapat meredam sinyal suara sinus hingga 4.5 dB pada frekuensi 120 Hz. Penurunan intensitas suara ini juga dapat terlihat pada osiloskop sebagai penurunan amplitudo sinyal error. Gambar 6 hingga 10 menunjukkan grafik sinyal saat sistem aktif dan tidak aktif. Pada beberapa frekuensi yang lainnya, sistem ANC tidak dapat meredam suara yang disebabkan oleh beberapa kendala seperti:

1. Pengaturan *gain* sinyal *anti-noise* yang sulit karena dipengaruhi adanya efek umpan balik dari *canceller speaker* ke mikrofon referensi
2. Penyesuaian agar sinyal *anti-noise* tepat berbeda 180° sangat sulit
3. Sinyal suara yang didapatkan oleh mikrofon referensi mengalami distorsi akibat keterbatasan respon dari mikrofon referensi.
4. Efek gelombang diam pada *acoustic duct* yang menyebabkan amplitudo pada frekuensi tertentu menjadi kecil
5. Keadaan lingkungan di sekitar *acoustic duct* juga mempengaruhi peredaman yang terjadi
6. Perubahan sinyal suara referensi akibat *anti-noise* yang dikeluarkan oleh *canceller speaker*

Beberapa kendala inilah yang berpengaruh pada keberhasilan sistem dalam meredam suara yang ada. Peredaman yang tidak maksimal pada frekuensi 280 – 440 Hz disebabkan karena pengaturan gain. Perubahan fasa dari sinyal *anti-noise* tidak mempengaruhi tingkat kekerasan *noise* pada *acoustic duct*. Dari hasil pengujian yang dilakukan juga diketahui bahwa penurunan amplitudo sinyal referensi dan sinyal error pada beberapa frekuensi tertentu tidak menunjukkan penurunan tingkat kekerasan suara pada ujung *acoustic duct* yang terbuka. Hal ini dapat disebabkan oleh karena perbedaan posisi antara mikrofon referensi, mikrofon error, dan dB meter. Dari hasil pengujian dapat diketahui juga bahwa amplitudo sinyal suara yang tertangkap oleh mikrofon juga dipengaruhi oleh frekuensi suara. Fenomena ini dikenal sebagai gelombang diam pada pipa organa terbuka.



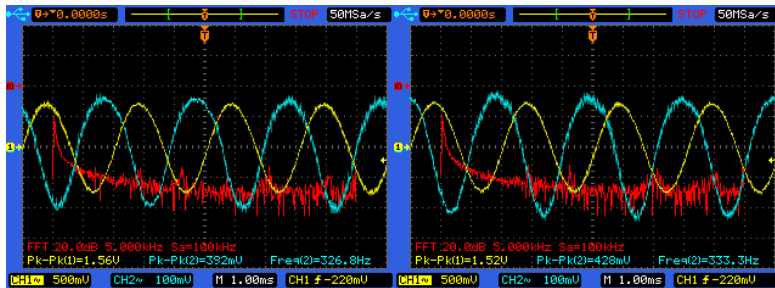
Gambar 4.6 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 122 Hz



ANC Off

ANC On

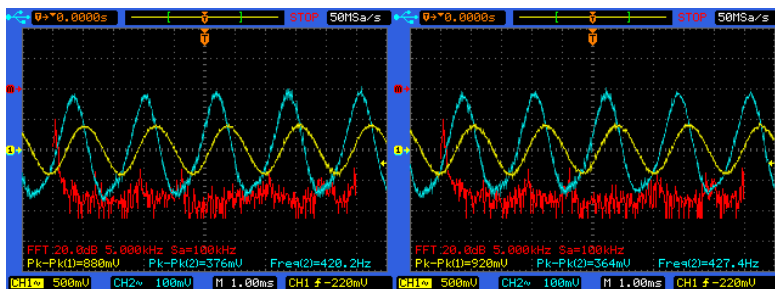
Gambar 4.7 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 217,4 Hz



ANC Off

ANC On

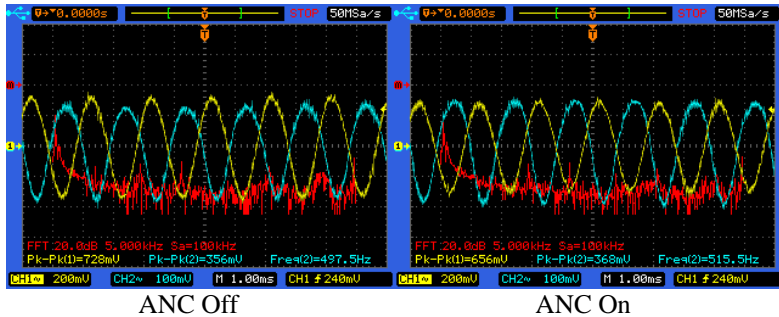
Gambar 4.8 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 326,8 Hz



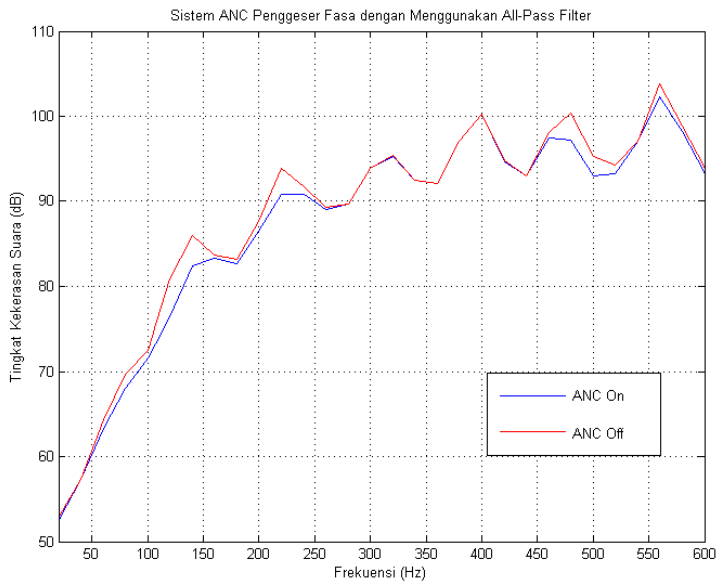
ANC Off

ANC On

Gambar 4.9 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 420,2 Hz



Gambar 4.10 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 497,5 Hz

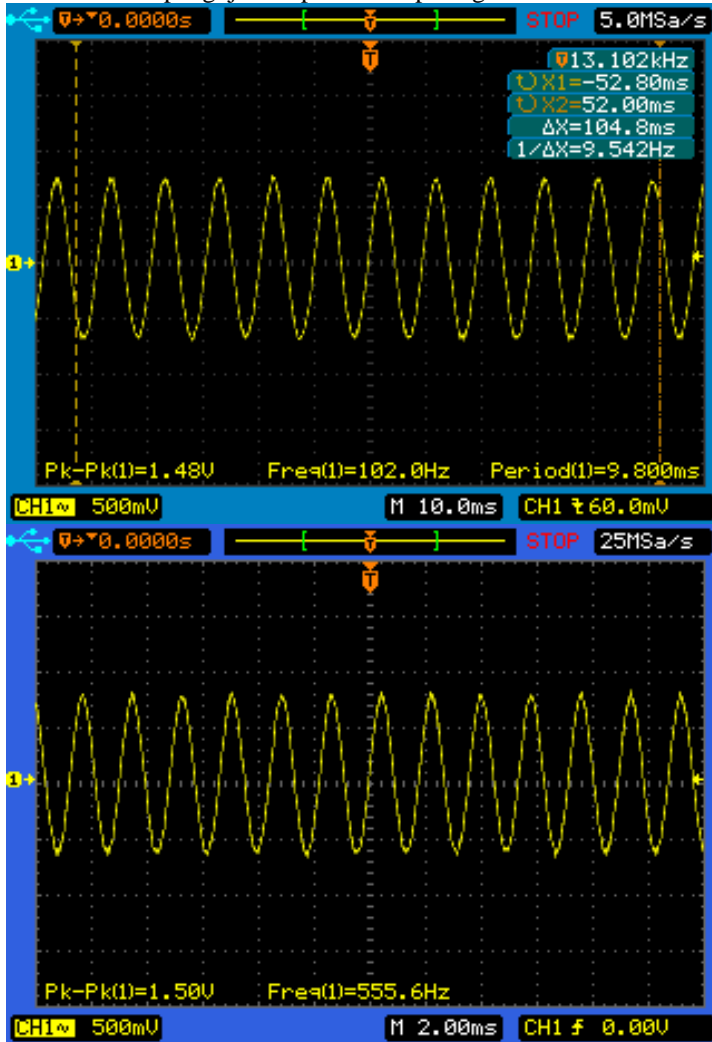


Gambar 4.11 Plot intensitas suara terhadap frekuensi

4.3 Pengujian Fenomena Gelombang Diam pada *Acoustic Duct*

Pengujian fenomena gelombang suara pada *acoustic duct* dilakukan dengan melihat besar gelombang suara pada mikrofon baik mikrofon referensi dan mikrofon error. Pengujian dilakukan dengan memberikan

sinyal sinus pada *noise speaker* dengan amplitudo pada *noise speaker* adalah 1.5 Vpp. Bentuk sinyal sinus yang dikeluarkan oleh *noise speaker* untuk melakukan pengujian dapat dilihat pada gambar 4.12.

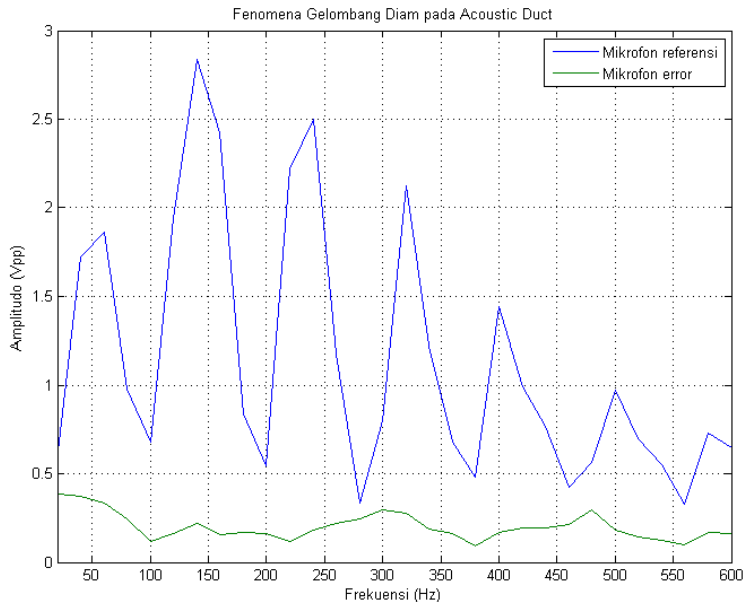


Gambar 4.12 Sinyal input noise speaker (frekuensi 102 Hz dan 555,6Hz)

Tabel 4.2 Gelombang diam pada *acoustic duct*

Frekuensi	Ref(Vpp)	Err(Vpp)
20	0.6	0.384
40	1.72	0.376
60	1.86	0.336
80	0.98	0.248
100	0.68	0.12
120	1.94	0.16
140	2.84	0.22
160	2.42	0.158
180	0.84	0.168
200	0.544	0.164
220	2.22	0.118
240	2.5	0.18
260	1.18	0.222
280	0.336	0.248
300	0.8	0.3
320	2.12	0.28
340	1.22	0.188
360	0.68	0.16
380	0.48	0.092
400	1.44	0.168
420	0.992	0.192
440	0.768	0.192
460	0.424	0.216
480	0.568	0.296
500	0.976	0.184
520	0.696	0.144
540	0.552	0.124

Frekuensi	Ref (Vpp)	Err(Vpp)
560	0.328	0.096
580	0.728	0.168
600	0.648	0.164



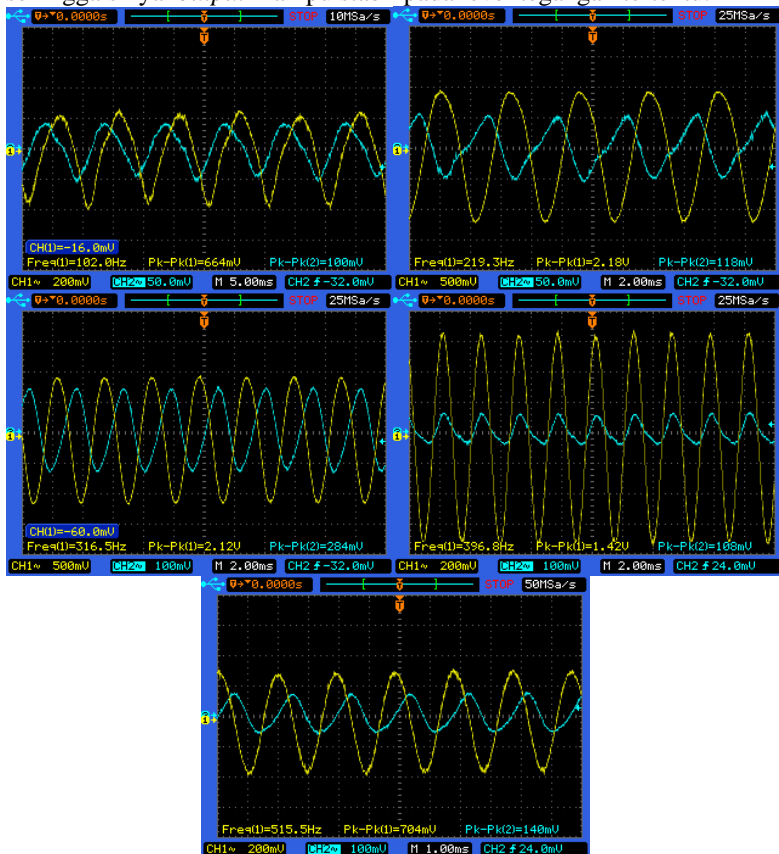
Gambar 4.13 Sinyal output pre-amplifier pada *acoustic duct*

Gambar 4.13 menunjukkan plot data tegangan referensi dan error terhadap frekuensi. Dari gambar 4.13 dapat dilihat bahwa amplitudo sinyal suara berubah-ubah pada tiap frekuensi. Puncak amplitudo sinyal suara mikrofon referensi dari data yang didapatkan terjadi pada frekuensi 140 Hz, 240 Hz, 320 Hz, 400 Hz, dan 500 Hz, sedangkan amplitudo sinyal suara mikrofon terkecil terjadi pada frekuensi 20 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 280 Hz, 380 Hz, 460 Hz, dan 560 Hz. Amplitudo sinyal mikrofon error juga mengalami naik turun namun besar amplitudonya relatif stabil di 200 mVpp untuk frekuensi dari 20-600 Hz. Grafik sinyal mikrofon referensi dan sinyal mikrofon error untuk beberapa frekuensi dapat dilihat pada gambar 4.14. Naik turunnya amplitudo sinyal pada mikrofon referensi

serta besar amplitudo sinyal mikrofon error yang relatif rendah ini dipengaruhi oleh:

1. Efek gelombang diam pada *acoustic duct*
2. Jarak antara *noise speaker* dengan mikrofon

Untuk menanggulangi efek gelombang diam pada *acoustic duct*, maka keluaran dari *pre-amplifier* harus diberi *amplifier* dimana penguatannya mampu beradaptasi dengan sinyal *input* yang masuk sehingga sinyal *output* mampu stabil pada level tegangan tertentu.



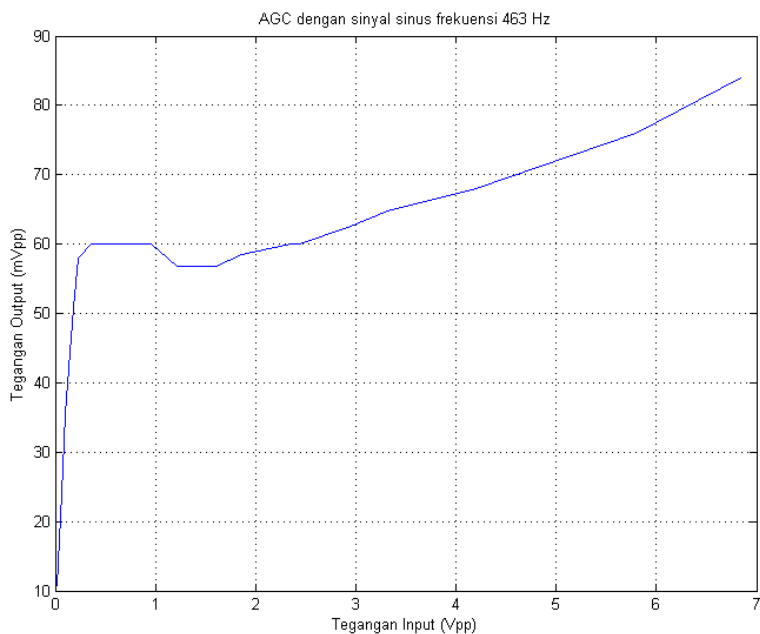
Gambar 4.14 Sinyal mikrofon referensi (kuning) dan sinyal mikrofon error (biru) pada frekuensi 100 Hz, 220 Hz, 320 Hz, 400 Hz, dan 520 Hz

4.4 Pengujian *Automatic Gain Controller*

Rangkaian *automatic gain controller* digunakan untuk menguatkan sinyal yang diperoleh dari mikrofon. Rangkaian ini mampu menyesuaikan penguatannya sesuai dengan sinyal inputnya sehingga amplitudo sinyal keluaran stabil. Pengujian rangkaian *automatic gain controller* tanpa *amplifier* dilakukan dengan menguatkan sinyal sinus dengan amplitudo yang berbeda-beda. Sinyal sinus yang digunakan memiliki frekuensi 463 Hz. Dari tabel 4.3 dapat dilihat bahwa amplitudo sinyal input tidak mempengaruhi amplitudo sinyal output AGC tanpa *amplifier* dari rentang input 180 mVpp hingga 5,80 Vpp sehingga AGC telah berfungsi dengan baik. Plot tabel 4.3 dapat dilihat pada gambar 4.15. Dengan menambahkan rangkaian *non-inverting amplifier*, pengujian untuk penguatan sinyal output *pre-amplifier*. Pengujian yang dilakukan sama dengan pengujian fenomena gelombang diam. *Noise speaker* akan mengeluarkan sinyal sinus dengan amplitudo sebesar 1,5 Vpp dari frekuensi 20 hingga 600 Hz.

Tabel 4.3 AGC dengan sinyal sinus frekuensi 463 Hz

Input (Vpp)	Output (mVpp)
0.0232	10.8
0.060	24
0.0952	35.6
0.180	50.8
0.232	58
0.356	60
0.468	60
0.624	60
0.792	60
0.96	60
1.220	56.8
1.600	56.8
1.860	58.4
2.360	60
2.440	60
2.920	62.4
3.320	64.8
4.200	68
5.800	76
6.840	84



Gambar 4.15 Plot AGC dengan sinyal sinus frekuensi 463 Hz

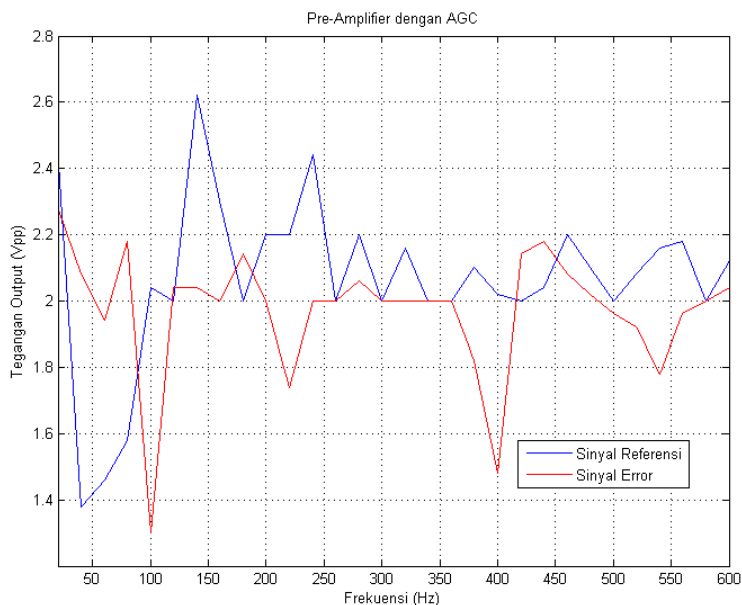
Tabel 4.4 Amplitudo sinyal pada *acoustic duct*

Frekuensi	Ref(Vpp)	Err(Vpp)
20	2.44	2.28
40	1.38	2.08
60	1.46	1.94
80	1.58	2.18
100	2.04	1.3
120	2	2.04
140	2.62	2.04
160	2.3	2
180	2	2.14
200	2.2	2

Frekuensi	Ref(Vpp)	Err(Vpp)
220	2.2	1.74
240	2.44	2
260	2	2
280	2.2	2.06
300	2	2
320	2.16	2
340	2	2
360	2	2
380	2.1	1.82
400	2.02	1.48
420	2	2.14
440	2.04	2.18
460	2.2	2.08
480	2.1	2.02
500	2	1.96
520	2.08	1.92
540	2.16	1.78
560	2.18	1.96
580	2	2
600	2.12	2.04

Pada gambar 4.16 dapat kita lihat bahwa level tegangan sinyal *output* lebih besar dan lebih stabil pada 2 Vpp untuk frekuensi dari 20 hingga 600 Hz. Efek gelombang diam pada *acoustic duct* sudah tidak terlihat pada sinyal *output*. Meskipun terdapat amplitudo sinyal referensi dan sinyal error dengan frekuensi tertentu memiliki amplitudo yang lebih kecil dari 2 Vpp namun amplitudo sinyal masih cukup besar untuk diproses secara digital. Pemrosesan sinyal secara *digital* memerlukan amplitudo yang besar karena amplitudo sinyal yang kecil akan sulit untuk disampling dan direkonstruksi. Sulit untuk menyampling dan

merekonstruksi sinyal secara akurat disebabkan karena resolusi dari ADC dan DAC.



Gambar 4.16 Output sinyal *pre-amplifier* dengan AGC

4.5 Pengujian *Active Noise Cancellation* dengan Filter Adaptif FxLMS

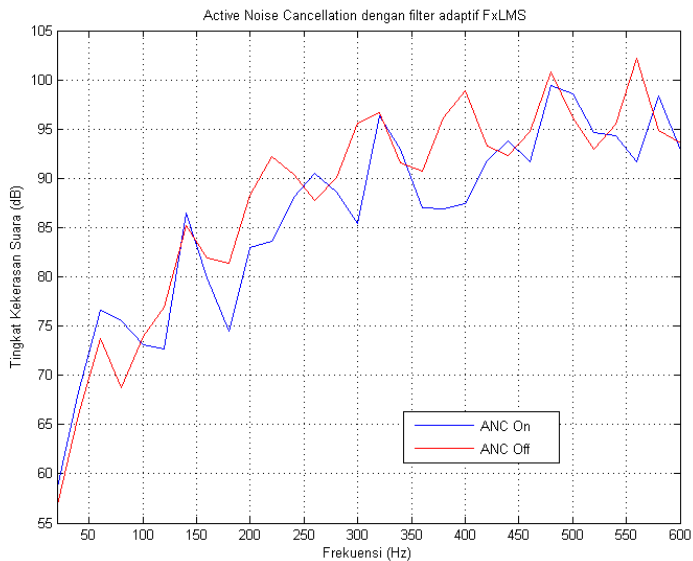
Pengujian sistem ANC dengan filter adaptif FxLMS dilakukan untuk mengetahui efektivitas dari sistem ANC yang dibuat. Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal sinus dengan amplitudo sebesar 1,5 Vpp dari frekuensi 20 hingga 600 Hz pada *speaker source*. Sebelum memberikan suara bising pada *acoustic duct*, sistem akan melakukan inisialisasi sistem berupa *secondary path modelling* untuk memodelkan path dari *speaker canceller* hingga mikrofon error. *Secondary path modelling* ini bertujuan untuk mensinkronisasi sistem dengan *acoustic duct*. Pemodelan *secondary path* ini dilakukan dengan memberikan sinyal random pada *speaker canceller*, kemudian filter adaptif $c(n)$ akan menyesuaikan koefisiennya dengan *path* dari *speaker canceller* hingga mikrofon error agar didapatkan filter yang memiliki karakteristik yang sama dengan *path* tersebut.

Tabel 4.5 *Active Noise Cancellation* dengan Filter Adaptif FxLMS

Frekuensi	ANC On(dB)	ANC Off(dB)
20	58.4	56.6
40	68.3	66
60	76.6	73.7
80	75.5	68.7
100	73.1	73.9
120	72.7	76.9
140	86.45*	85.2
160	79.9*	81.9
180	74.5	81.4
200	83	88.3
220	83.6	92.2
240	88.1	90.4
260	90.5	87.8
280	88.6	90.1
300	85.4	95.6
320	96.3*	96.7
340	93	91.6
360	87	90.7
380	86.9	96.1
400	87.4	98.9
420	91.8	93.3
440	93.8	92.3
460	91.65*	94.8
480	99.4*	100.8
500	98.6	96.1
520	94.7	92.9

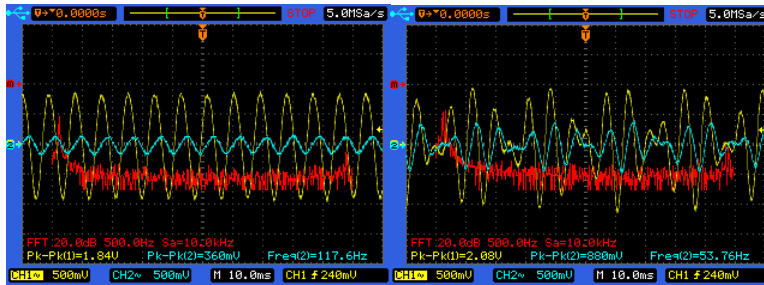
Frekuensi	ANC On(dB)	ANC Off(dB)
540	94.3	95.5
560	91.7	102.2
580	98.35*	94.9
600	92.85*	93.6

*: nilai rata-rata dari batas atas dan batas bawah osilasi



Gambar 4.17 *Active Noise Cancellation* dengan Filter Adaptif FxLMS

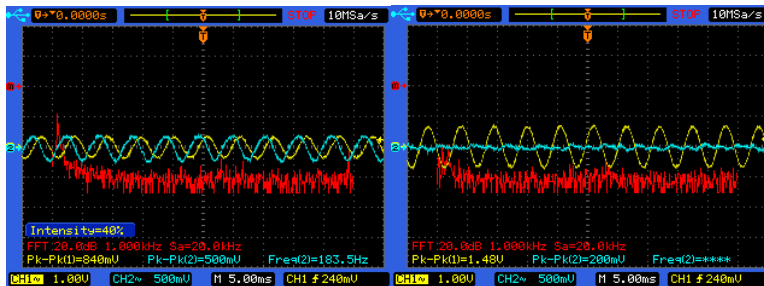
Pada hasil pengujian sistem ANC dapat dilihat bahwa sistem ANC yang dibuat hanya dapat meredam suara pada beberapa frekuensi saja. Peredaman yang paling besar terjadi pada suara dengan frekuensi 400 Hz sebesar 11,5 dB. Sistem ANC tidak dapat meredam suara dengan frekuensi 20, 40, 60, 80, 260, 340, 440, 500, dan 520 Hz. Sistem ANC juga mengalami osilasi pada frekuensi 140, 160, 320, 460, 480, 580, dan 600 Hz. *Adaptation step size* yang digunakan pada pengujian ini adalah 0,005 untuk *secondary path modelling* dan 0.0005 untuk *ANC mode*. Gambar 18 hingga 22 menunjukkan grafik sinyal referensi dan sinyal error. Pada hasil pengujian ini terdapat beberapa anomali-anomali yang akan dibahas lebih lanjut pada subbab berikutnya.



ANC Off

ANC On

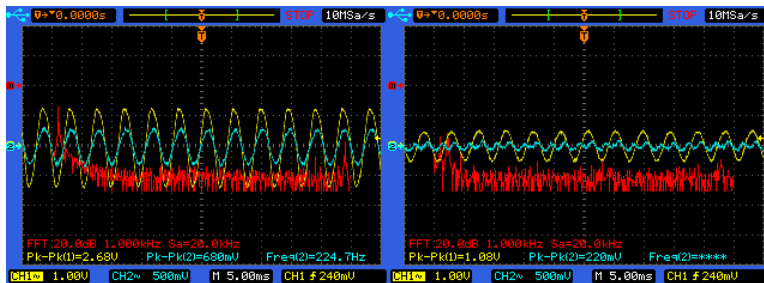
Gambar 4.18 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 117,6 Hz



ANC Off

ANC On

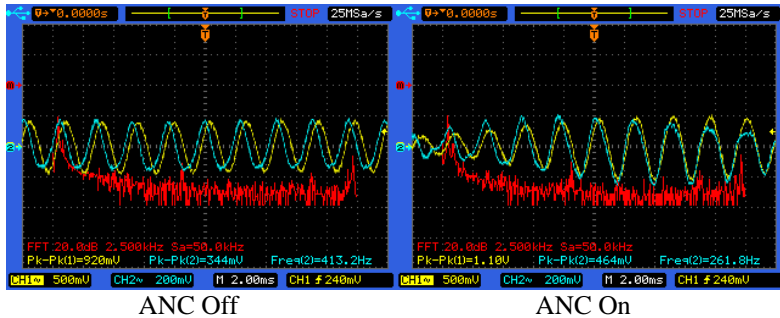
Gambar 4.19 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 183,5 Hz



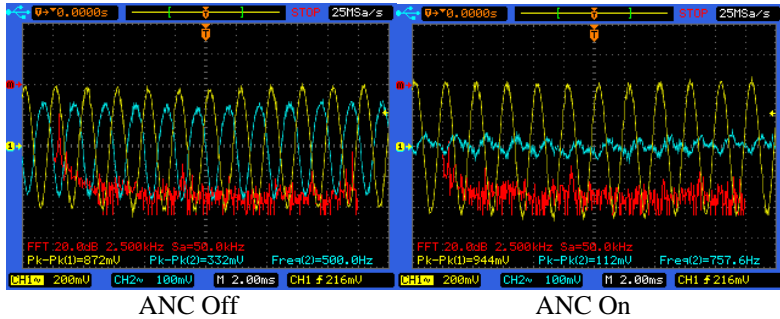
ANC Off

ANC On

Gambar 4.20 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 224,7 Hz



Gambar 4.21 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 413,2 Hz



Gambar 4.22 Sinyal referensi (kuning) dan sinyal error (biru) pada frekuensi 500 Hz

4.6 Anomali-Anomali Hasil Pengujian Sistem *Active Noise Cancellation* dengan Filter Adaptif FxLMS

Pada hasil pengujian sistem ANC dengan filter adaptif FxLMS ditemukan beberapa anomali, seperti:

- Penurunan amplitudo sinyal error yang tidak diikuti dengan penurunan level kekerasan suara
- Sistem mengalami kegagalan dan tidak responsif dalam meredam beberapa frekuensi suara bising
- Sistem tidak mampu konvergen dan mengalami osilasi pada beberapa frekuensi suara bising

Gambar 23 hingga 27 menunjukkan level suara pada ujung terbuka dari *acoustic duct*.



ANC Off

ANC On

Gambar 4.23 Level kekerasan suara bising frekuensi 117,6 Hz



ANC Off

ANC On

Gambar 4.24 Level kekerasan suara bising frekuensi 183,5 Hz



ANC Off

ANC On

Gambar 4.25 Level kekerasan suara bising frekuensi 224,7 Hz



ANC Off ANC On
Gambar 4.26 Level kekerasan suara bising frekuensi 413,2 Hz



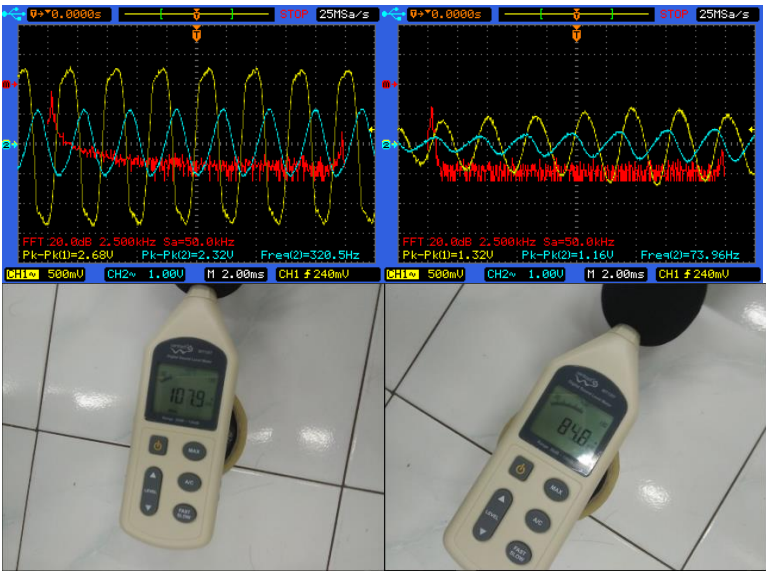
ANC Off ANC On
Gambar 4.27 Level kekerasan suara bising frekuensi 500 Hz

Dari gambar 22 dan 27 dapat dilihat bahwa amplitudo sinyal error sudah mengalami penurunan saat sistem diaktifkan namun level suara meningkat sebesar 2.4 - 2.5 dB saat sistem ANC diaktifkan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mengalami kegagalan karena pada beberapa frekuensi yang lain sistem berhasil meredam suara bising dengan diikuti oleh penurunan amplitudo dari sinyal error (Gambar 18-21, 23-26). Beberapa hal yang mungkin dapat mempengaruhi kegagalan sistem, yaitu posisi dari *speaker canceller* yang terlalu dekat dengan ujung terbuka *acoustic duct*, keadaan lingkungan sekitar dari *acoustic duct*, dan efek gelombang diam dari *speaker canceller*. Posisi dari *speaker canceller* yang terlalu dekat dengan ujung terbuka *acoustic duct* menyebabkan dB meter juga menerima suara anti-noise yang terproduksi bagian belakang dari *speaker canceller*. Selain itu, halangan atau benda-benda yang berada di depan ujung terbuka dari *acoustic duct* dapat mempengaruhi

pengukuran dari dB meter. Beberapa kemungkinan ini mungkin juga merupakan penyebab tidak responsifnya sistem ANC dalam meredam suara bising pada frekuensi tertentu. Perubahan bentuk sinyal akibat adanya sinyal anti-noise yang dikeluarkan oleh *speaker canceller* dapat berdampak pada sistem ANC.



Gambar 4.28 Grafik sinyal dan level kekerasan suara bising pada frekuensi 318,5 Hz



Level suara tertinggi

Level suara terendah

Gambar 4.29 Grafik sinyal dan level kekerasan suara bising saat sistem ANC aktif

Pada gambar 28 dan 29 dapat dilihat bahwa sistem mengalami osilasi pada frekuensi suara bising 318,5 Hz. Osilasi ini menyebabkan sistem tidak dapat bekerja dengan sempurna. Penyebab terjadinya osilasi pada sistem ANC adalah karena *adaptation step size* dari filter adaptif. *Adaptation step size* yang digunakan untuk memperbaharui koefisien filter adaptif terlalu besar untuk suara frekuensi tersebut sehingga sistem tidak dapat konvergen. *Adaptation step size* yang terlalu kecil juga menyebabkan sistem menjadi lambat untuk beradaptasi dengan perubahan frekuensi suara bising.

-halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Sistem ANC yang telah dibuat adalah sistem ANC dengan penggeser fasa dan sistem ANC dengan filter adaptif FxLMS. Sistem ANC dengan penggeser fasa mampu meredam suara hingga 4.5 dB pada sinyal suara sinus frekuensi 120 Hz sedangkan sistem ANC dengan filter adaptif FxLMS mampu meredam suara bising berfrekuensi 400 Hz hingga 11,5 dB. Beberapa hal yang mempengaruhi keberhasilan sistem ANC untuk meredam suara adalah:

1. Efek gelombang diam pada *acoustic duct*
2. Keadaan lingkungan di sekitar *acoustic duct*
3. Perubahan sinyal suara referensi akibat *anti-noise* yang dikeluarkan oleh *canceller speaker*
4. Desain dari *acoustic duct* yang digunakan
5. Posisi dari mikrofon referensi, mikrofon error, dan *speaker canceller*
6. *Adaptation step size* dari filter adaptif dan pemodelan *secondary path*
7. Pengaturan *gain* sinyal anti-noise

Efek gelombang diam pada *acoustic duct* dapat diminimalisir dengan penggunaan rangkaian AGC. Perubahan sinyal input akibat sinyal *anti-noise* dapat diminimalisir dengan penggunaan filter adaptif FxLMS sehingga menyebabkan sistem lebih mudah untuk menyesuaikan dengan perubahan frekuensi input. Pemilihan *adaptation step size* yang tepat diperlukan agar sistem dapat beradaptasi dengan cepat dan mudah untuk konvergen.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penelitian yang lebih lanjut dari tugas akhir ini adalah:

1. Menggeser posisi *speaker canceller* menjauhi ujung terbuka dari *acoustic duct*
2. Menggunakan dua atau lebih frekuensi sebagai suara bising
3. Mengembangkan bandwidth frekuensi suara yang dapat diredam

4. Menggunakan *Automatic Gain Controller* yang dapat diatur dengan mikrokontroler
5. Menggunakan filter adaptif jenis yang lainnya seperti kalman filter

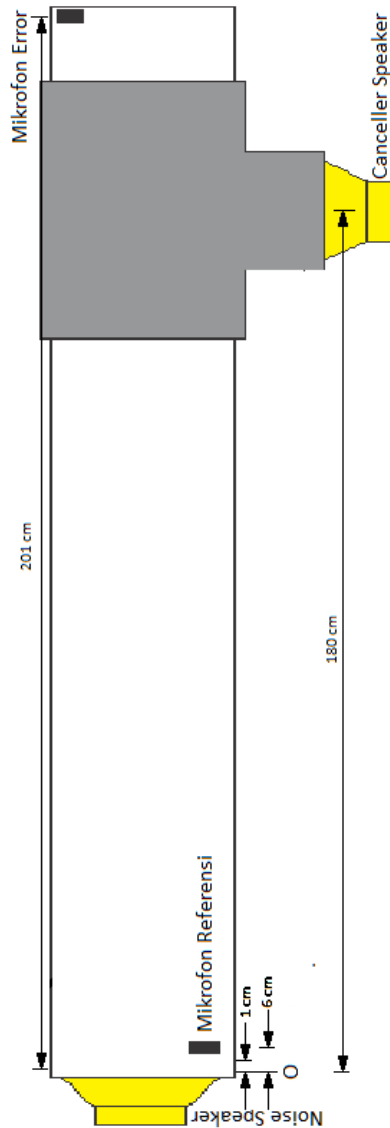
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Burian, Lorant and Fuchs, Peter. 2005. **A Simple Active Noise Control in Acoustic Ducts**. Proceedings of the 2005 European Conference on Circuit Theory and Design
- [2] Costin, Mark H. Costin dan Elzinga, Donald R. 1989. **Active Reduction of Low Frequency the Impact Noise Using Digital Feedback Control**. IEEE Controls System Magazine.
- [3] Hansen, Colin H. 2001. **Fundamental of Acoustics**. Federal Institute of Occupational Safety and Health.
- [4] Kuo, Sen M., Panahi, Issa, Chung, Kai M., Horner, Tom, Nadeski, Mark, and Chyan, Jason. 1996. **Design of Active Noise Control with the TMS320 Family**. Texas Instrument Application Report
- [5] Lamancusa, John S. 2000. **Physics of Sound**. Penn State University.
- [6] Qiu, Xiaojun, Lu, Jing, and Pan, Jie. 2014. **A New Era for Applications of Active Noise Control**. Inter-noise 2014

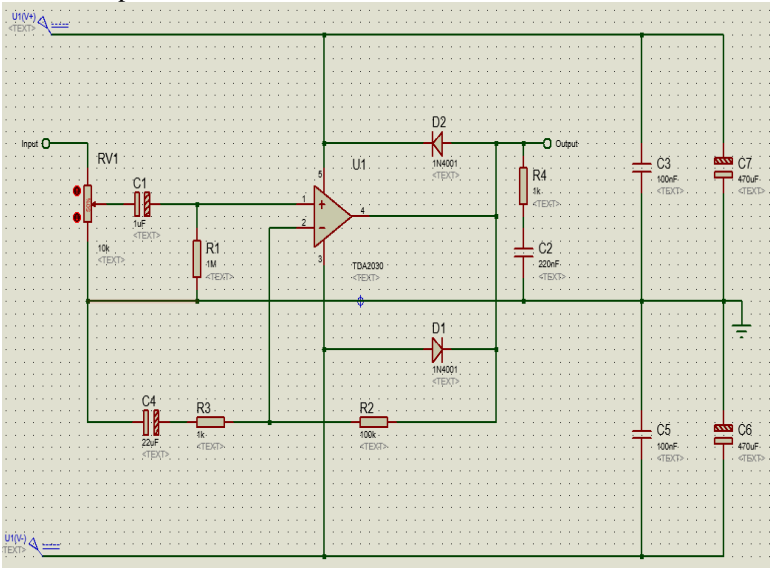
-halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

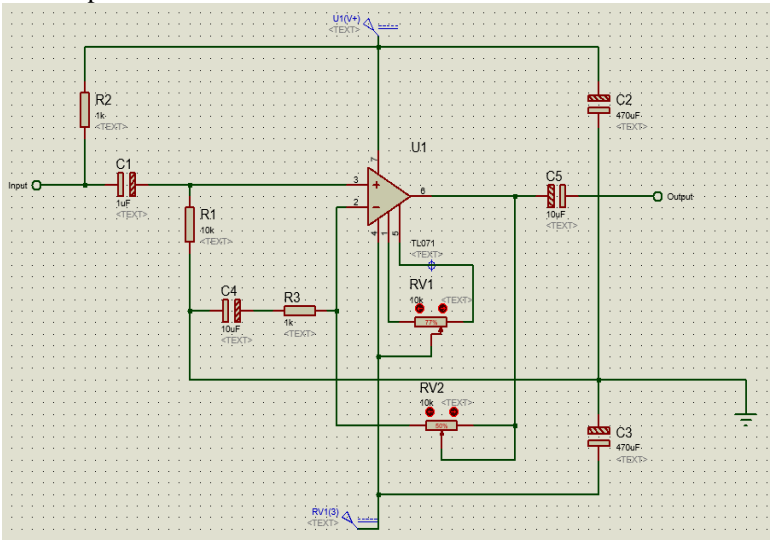
-Acoustic duct

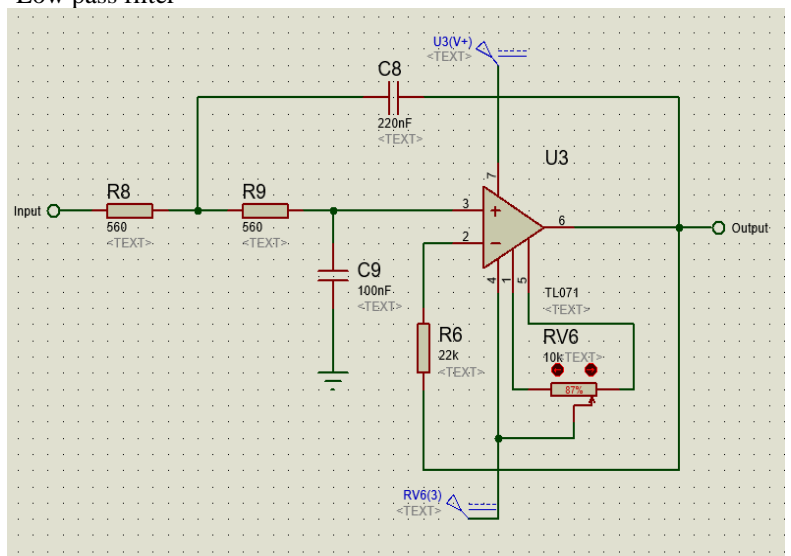
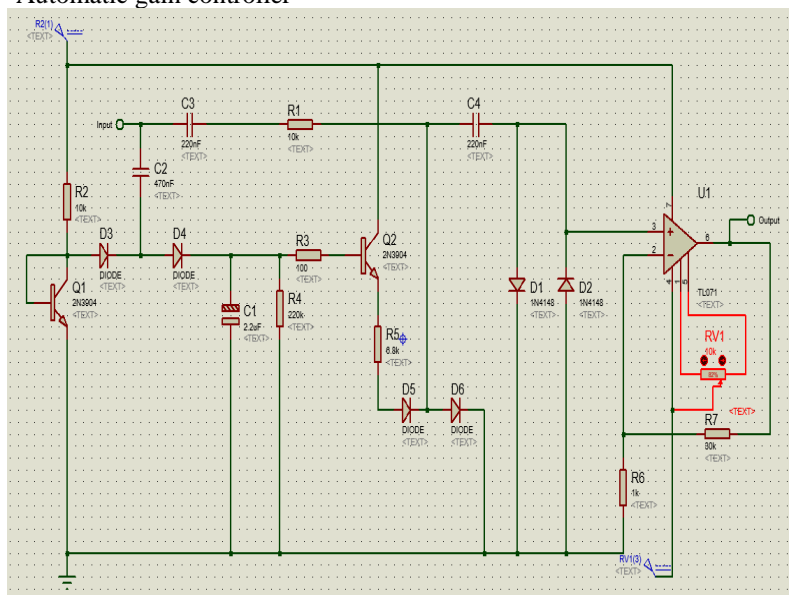


-Power amplifier

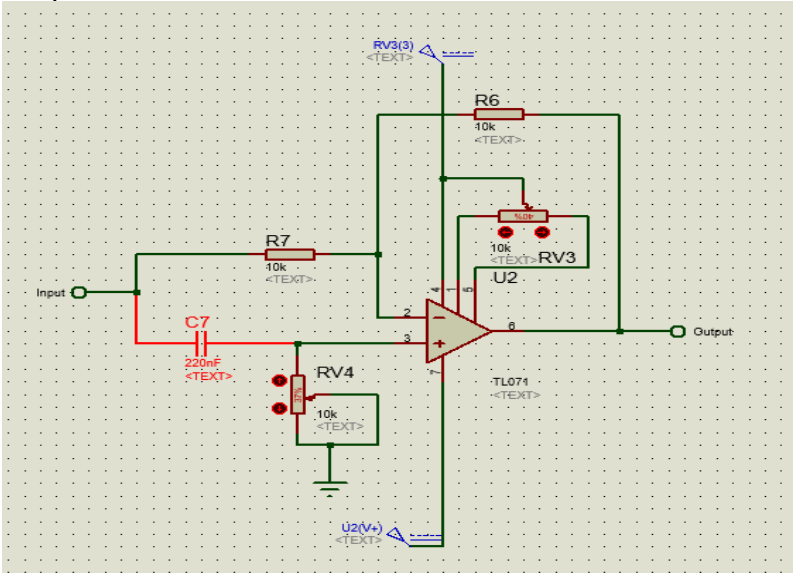


-Pre-amplifier

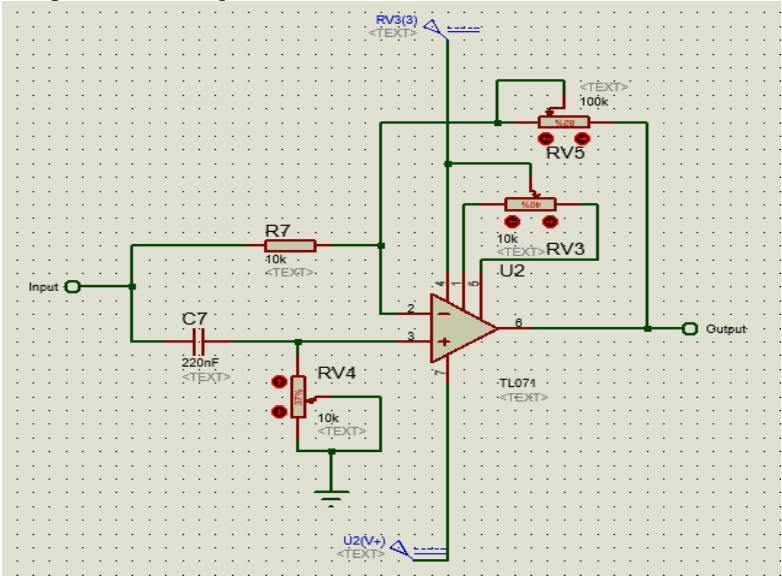




-All pass filter



-All pass filter with gain



RIWAYAT PENULIS



Albert Christianto lahir di Mojokerto pada 23 Desember 1994. Beliau memulai pendidikan formalnya di SD Kristen Petra 5 Surabaya pada 2001-2007. Beliau kemudian melanjutkan pendidikan ke SMP Kristen Petra 3 Surabaya pada 2007-2010 dan ke SMA Kristen Petra 2 Surabaya pada 2010-2013. Setelah lulus SMA, beliau melanjutkan pendidikan sarjananya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya bidang studi elektronika. Beliau pernah mengikuti Perkemahan Ilmiah Remaja Nasional yang diadakan oleh Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia pada tahun 2009. Pada pelatihan tersebut, kelompok beliau menjadi kelompok terbaik dalam penulisan karya tulis ilmiah di bidang ilmu pengetahuan alam.

Email:

albertchristianto1994@gmail.com/albert.christianto13@mhs.ee.its.ac.id

-halaman ini sengaja dikosongkan